



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**RECUPERAÇÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO COM O USO  
DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO E FIBRAS DE  
ARAMIDA**

Aline Cristina Lay

Lajeado, novembro de 2018

Aline Cristina Lay

**RECUPERAÇÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO COM O USO  
DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO E FIBRAS DE  
ARAMIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II,  
apresentado ao Centro de Ciências Exatas e  
Tecnológicas da Universidade do Vale do  
Taquari, Univates, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Civil.

Orientador: Prof. Me. Douglas Ferreira Velho

Lajeado, novembro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos meus pais Valmor e Rosa, por terem me apoiado na escolha do curso de Engenharia Civil e me ensinado a ter coragem, a lutar pelos meus objetivos, a perdoar, a cair e a levantar.

Ao meu marido Guilherme, amigo e companheiro de todas as horas, obrigada pela paciência, compreensão pelos momentos em que não estive presente, por ter assumido as tarefas domésticas quando não pude fazê-las, pela ajuda na realização da prática da minha pesquisa e obrigada por todo o apoio que me deu ao longo de toda graduação, sempre dizendo que “vai dar tudo certo”.

Aos professores da instituição, pelos ensinamentos repassados com empenho e dedicação, em especial ao meu professor e orientador Douglas Ferreira Velho, que me acompanhou na pesquisa ao longo de todo o ano, sempre me dando auxílio sem medir esforços, com respostas racionais e objetivas, sendo essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

A Deus por ter me guiado todo esse tempo, por me dar forças para poder lutar e não desistir, por ter colocado pessoas boas em meu caminho e por me manter debaixo do seu amor.

*“O pior ignorante é o falso sábio.  
O verdadeiro sábio é aquele que  
sabe que ainda tem muito o que  
aprender”*

*Caio Carneiro.*

## RESUMO

O uso de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) como reforço em estruturas de concreto armado que necessitem o aumento e recuperação de sua resistência, começou a ser avaliado na década de 70, sendo considerado como uma alternativa eficaz em construções civis, principalmente nos casos em que o aumento de seções causam interferência na utilização da edificação, como garagens e em situações onde os ambientes agressivos impedem a aplicação de materiais susceptíveis à corrosão, como por exemplo o aço. Embora os diversos estudos positivos quanto ao emprego dos PRF, principalmente os formados com fibras de carbono em obras civis, há diversas possibilidades de avanço a serem exploradas. Neste contexto, o presente trabalho consiste em avaliar a potencialidade e eficiência da técnica de reforço por colagem de PRF formados com fibras de vidro e fibras de aramida em uma matriz epoxídica, em vigas reforçadas à flexão através do ensaio de flexão em quatro pontos. As vigas ensaiadas correspondem a uma escala reduzida em relação a vigas próximas da realidade, executadas no laboratório da própria Universidade. Para a etapa da realização dos ensaios, calculou-se a abertura de fissura no estado limite de serviço, flecha imediata e carregamento teórico, obtendo os valores de 0,0062 mm, 3,2 mm e 15,86 KN, respectivamente. Os ensaios foram realizados em duas etapas, sendo que na primeira realizou-se o pré-carregamento dos elementos no ELS a partir dos dados calculados, na qual a prática atendeu aos parâmetros calculados; posterior, os elementos foram reforçados à flexão com o compósito, e por fim, aplicou-se o carregamento até o limite de capacidade dos elementos. A partir dos resultados obtidos, foi possível averiguar o comportamento dos elementos, assim como averiguar o ganho de resistência dos mesmos. Para o uso de compósitos reforçados com fibra de aramida, o método se apresentou mais eficiente em relação ao compósito reforçado com fibra de vidro, apresentando um acréscimo de resistência na ordem de 7,64% e 1,60%, respectivamente, no ELU. Os mesmos não demonstravam evidências de alcançar sua capacidade limite, geralmente fissuravam gradativamente e de modo repentino ocorria a ruptura do reforço.

**Palavras chaves:** Reforço à Flexão. Recuperação. Fibra de Vidro. Fibra de Aramida

## ABSTRACT

The use of Reinforced Polymers with Fibers (PRF) as reinforcement in reinforced concrete structures in which they need the increase and recovery of their resistance, began to be evaluated in the decade of the 70, being considered like an effective alternative in civil constructions, mainly in the cases in which increased sections cause interference in the use of the building, such as garages and in situations where harsh environments prevent the application of materials susceptible to corrosion, such as steel. Although the various positive studies on the use of PRFs, especially those formed with carbon fibers in civil works, there are several possibilities for advancement to be explored. In this context, the present work consists in evaluating the potentiality and efficiency of the reinforcement technique by bonding PRF formed with glass fibers and aramid fibers in an epoxy matrix in flexural strengthened beams through the four point test. The beams tested correspond to a reduced scale in relation to beams close to reality, executed in the laboratory of the University itself. For the stage of the tests, the crack opening was calculated in the service limit state, immediate arrow and theoretical loading, obtaining values of 0.0062mm, 3.2mm and 15.86 KN respectively. The tests were performed in two stages, in the first one, the elements were preloaded in the ELS from the calculated data, in which the practice met the calculated parameters; later, the elements were flexed reinforced with the composite, and finally applied the load to the capacity limit of the elements. From the obtained results, it was possible to verify the behavior of the elements, as well as to verify the resistance gain of the elements. For the use of composites reinforced with aramid fiber, the method was more efficient in relation to the glass fiber reinforced composite, presenting an increase of resistance in the order of 7.64% and 1.60%, respectively, in the ELU. They did not show evidence of reaching their limiting ability, they usually cracked gradually and suddenly the reinforcement rupture occurred.

**Keywords:** Flexion Reinforcement. Recovery. Glass Fiber. Aramid Fiber.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das estratégias de renovação .....	12
Figura 2 - Comparação de algumas propriedades entre aço, alumínio e material compósito de PRF. ....	16
Figura 3 - Comparação de algumas propriedades entre aço, alumínio e material compósito de PRF. ....	18
Figura 4 - Compósito de fibra de aramida .....	19
Figura 5 - Sistema de aplicação dos tecidos reforçados com fibra .....	22
Figura 6 - Formação de fissuras por assentamento plástico do concreto.....	25
Figura 7 - Processos do mecanismo de corrosão das armaduras .....	26
Figura 8 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto.....	29
Figura 9 - Reforço por colagem e chumbamento de perfis metálicos.....	31
Figura 10 - Reforço com adição de armadura em viga .....	32
Figura 11 - Fluxograma do programa experimental.....	36
Figura 12 - Aplicação do reforço à flexão .....	37
Figura 13 - Curva granulométrica agregado graúdo .....	38
Figura 14 - curva granulométrica agregado graúdo.....	39
Figura 15 - Ensaio de flexão a quatro pontos .....	42
Figura 16 - Carregamentos teóricos .....	45
Figura 17 - Detalhamento armadura.....	49
Figura 18 - Fôrmas em MDF.....	50
Figura 19 - Estribos .....	50

Figura 20 - Armadura à flexão simples .....	51
Figura 21 - Adensamento com vibrador de imersão .....	51
Figura 22 – Vigas concretadas e acabadas .....	52
Figura 23 - Pré-carregamento das vigas .....	58
Figura 24 - Pré-carregamento das vigas .....	58
Figura 25 - Imprimação da superfície .....	59
Figura 26 - Camada epóxi anterior à colagem.....	60
Figura 27 - Aplicação do reforço concluído .....	61
Figura 28 - Elementos reforçados com fibra de aramida .....	62
Figura 29 - Elementos reforçados com fibra de vidro .....	62
Figura 30 - Elementos sem aplicação do reforço .....	63
Figura 31 - Viga 3A.....	65
Figura 32 - Viga 3B.....	65
Figura 33 - Viga 3C .....	66
Figura 34 - Viga 2A.....	67
Figura 35 - Viga 2B.....	68
Figura 36 - Viga 2C .....	68
Figura 37 - Viga 1A.....	70
Figura 38 - Viga 1B.....	71
Figura 39 - Viga 1C .....	71



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades compósitos reforçados com fibras de Vidro, Carbono e Aramida. ....	20
Tabela 2 - Resina Epóxi bicomponente - imprimação.....	22
Tabela 3 – Resina epóxi bicomponente – estucamento .....	23
Tabela 4 – Resina epóxi bicomponente – aplicação da fibra .....	23
Tabela 5 – Classificação da agressividade em relação ao ambiente .....	27
Tabela 6 – Exigência relativas à fissuração em relação a classe de agressividade ..	29
Tabela 7 – Características do CP V ARI.....	40
Tabela 8 – Características do aço .....	40
Tabela 9 – Características do tecido de fibra de vidro .....	41
Tabela 10 – Características do tecido de fibra de aramida .....	41

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Tema .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.1 Delimitação do tema .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.1 Objetivo gral.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Justificativa.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4 Estrutura da pesquisa.....</b>	<b>14</b>
 <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	 <b>16</b>
<b>2.1 Polímeros reforçados com fibra .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Propriedades dos compósitos .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1 Fibra de Aramida.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2 Fibra de vidro .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3 Processos de fabricação das fibras.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.4 Aplicação do reforço estrutural.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 Formação das fissuras .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.1 Contração plástica do concreto .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.2 Perda de aderência das barras da armadura/assentamento do concreto .</b>	<b>24</b>
<b>2.3.3 Movimentação de fôrmas e escoramento.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.4 Corrosão das armaduras .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4 Fissuras em viga por flexão .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5 Estado Limite de Serviço de abertura de fissuras em seções de concreto armado submetidas a flexão simples.....</b>	<b>27</b>
<b>2.6 Vida útil de projeto .....</b>	<b>29</b>
<b>2.7 Métodos de reforço estrutural.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7.1 Reforço com perfis ou chapas metálicas .....</b>	<b>31</b>
<b>2.7.2 Reforço com aumento da seção transversal.....</b>	<b>32</b>
<b>2.7.3 Reforço com polímeros reforçados com fibras .....</b>	<b>33</b>

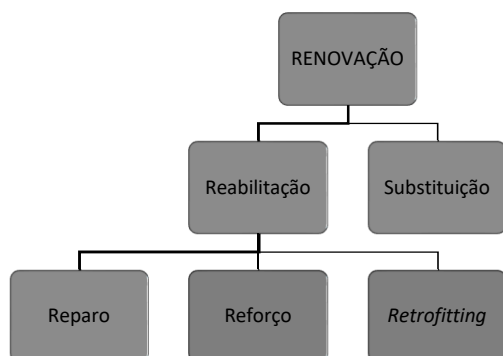
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>34</b>
3.1 Programa experimental.....	36
3.2 Materiais.....	38
3.2.1 Brita.....	38
3.2.2 Areia .....	39
3.2.3 Cimento .....	39
3.2.4 Aço .....	40
3.2.5 Polímero reforçado com fibra de vidro .....	40
3.2.6 Polímero reforçado com fibra de aramida .....	41
3.3 Dimensionamento .....	41
3.3.1 Armadura à flexão.....	42
3.3.2 Armadura ao cisalhamento .....	46
3.4 Processos e dosagens.....	49
3.5 Montagem das peças .....	49
3.6 Testes Mecânicos.....	52
3.6.1 Primeira etapa do ensaio .....	53
3.6.1.1 Abertura de frrura no ELS .....	53
3.6.1.2 Deslocamentos ELS.....	55
3.6.1.3 Ensaio com o pre-carregamento.....	57
3.7 Aplicação dos reforços nas vigas .....	59
3.8 Ensaio final .....	61
 <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	 <b>64</b>
4.1 Resultados do Grupo 3: sem reforço à flexão .....	64
4.2 Resultados do Grupo 2: reforçado à flexão com fibra de vidro .....	66
4.3 Resultados do Grupo 1: reforçados à flexão com fibra de aramida .....	69
4.4 Resultados entre os grupos reforçados à flexão .....	72
 <b>5 CONCLUSÃO .....</b>	 <b>74</b>
 <b>REFERÊNCIAS .....</b>	 <b>76</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Tendo em vista o crescimento acelerado nas obras de engenharia, há a necessidade de reabilitação/reforço em estruturas de concreto armado, podendo estas serem motivadas por diversos fatores, sendo a deterioração dos materiais empregados, sobrecarga por alteração do uso ou uso inadequado da estrutura, falhas na execução do projeto, subdimensionamento, interpretação e detalhamento insuficiente do projeto, que acabam comprometendo a capacidade portante da estrutura, sendo necessário fazer as devidas intervenções. Cabe ressaltar ainda que o engenheiro tem como uma de suas responsabilidades antecipar e planejar possíveis falhas, e no caso de sua ocorrência, deverá ser investigado a sua motivação e tomar as medidas corretivas (GARCEZ, 2007).

A tomada de decisão entre execução de reforço de uma estrutura ou a reconstrução da estrutura incluindo as etapas de demolição, acaba sendo influenciada por características específicas de cada obra. Nesse processo de decisão, vários aspectos devem ser levados em consideração como: custos diretos e indiretos, prejuízos que a interrupção do uso da estrutura pode causar para a sociedade e para os estabelecimentos aos arredores. Dependendo da motivação da técnica de reforço, a relação custo-benefício pode ser alterada consideravelmente (GARCEZ, 2007). Segundo Beber (2003), diante da necessidade de intervenção para recuperação de uma estrutura, pode-se adotar duas estratégias conforme ilustrada na Figura 01.

Figura 1 - Fluxograma das estratégias de renovação



Fonte: Da autora, adaptado de BEBER (2003).

De acordo com Clímaco (2008), a partir da metade da década de 1990, materiais conhecidos como compósitos, foram introduzidos no reparo e reforço de estruturas, em particular os polímeros reforçados com fibras (PRF). São fibras com resistência elevada à tração (de carbono, vidro ou aramida) imersas em resinas epóxi com a combinação de produtos diversos em mantas flexíveis, barras, perfis, entre outros.

As fibras apresentam diversas vantagens construtivas como leveza, elevada resistência sem aumentar a seção do elemento, fácil aplicação e vantagem economicamente. Entre as diversas fibras encontradas atualmente no mercado e já testadas como reforços poliméricos, destacam-se as fibras de aramida e fibra de vidro, cujas propriedades mecânicas são inferiores à fibra de carbono, porém com um custo mais atrativo (GARCEZ, 2007).

Este trabalho é motivado pelo crescimento da necessidade de reforços estruturais e pelo grande potencial de utilização dos compósitos de fibra de vidro e fibra de aramida sem que haja demolição e reconstrução das estruturas.

## **1.1 Tema**

O tema do presente trabalho consiste na recuperação à flexão em vigas de concreto armado, com o emprego dos polímeros reforçados com fibra de aramida e fibra de vidro.

### **1.1.1 Delimitação do tema**

A presente pesquisa delimitou-se ao uso do tecido bidirecional de fibra de vidro e do tecido de fibra de aramida coladas com resina epóxi bi componente.

A concepção adotada para o método de ensaio foi voltada para vigas bi apoiadas em concreto armado reforçada a esforços de flexão simples.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a potencialidade e eficiência dos compósitos reforçados com fibra de vidro e fibra de aramida empregados como recuperação estrutural em vigas de concreto armado, comparando a capacidade resistente obtida entre as vigas com e sem os reforços mencionados.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos relacionados ao estudo da aplicação de polímeros reforçados com fibras (PRF) como reforço à flexão em vigas de concreto armado são:

- Analisar o ganho de resistência à flexão em viga de concreto armado reforçado com os dois diferentes PRF;
- Comparar os resultados obtidos com a utilização das duas diferentes fibras;
- Analisar as técnicas de aplicação dos compósitos, observando suas vantagens e desvantagens;

- Identificar a potencialidade de cada viga reforçada com PRF específico, comparando com o emprego do polímero reforçado com fibras de carbono já realizado na Instituição.

### **1.3 Justificativa**

Com o crescimento acelerado das construções em obras de concreto armado, os profissionais da área acabam por não tomar os cuidados devidos durante a execução dos projetos, em função dos curtos prazos postos a eles, como, leitura e interpretação do mesmo, escolha adequada dos materiais empregados, mão de obra não qualificada, bem como técnicas construtivas.

Com isto, muitas estruturas apresentam problemas estruturais antes mesmo de atingirem sua vida útil de projeto, necessitando intervenções corretivas para as mesmas, a fim de evitar a ruína, colocando em risco a vida de seus usuários.

Diante deste cenário, é interessante avaliar o desempenho de novos materiais para recuperação de estruturas, tendo este trabalho como foco a utilização de tecidos compósitos reforçados com fibras de vidro e fibra de aramida em vigas de concreto armado, a fim de proporcionar soluções de reforço sem que seja necessário a reconstrução do mesmo.

### **1.4 Estrutura da pesquisa**

O presente trabalho é apresentado em 5 capítulos, sendo que o primeiro descreve o tema a ser desenvolvido, apresentando o objetivo geral e os específicos, justificativa e a delimitação da pesquisa.

A revisão bibliográfica é apresentada no capítulo 2, abordando as características gerais das fibras de vidro e aramida, formação de fissuras e estados de limite de serviço para abertura de fissuras.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada, descrevendo os métodos aplicados para o desenvolvimento do trabalho.

Os resultados e discussões alcançados através dos ensaios realizados estão apresentadas no capítulo 4.

Por final, no capítulo 5 está descrita as conclusões e fechamento da presente pesquisa, avaliando o desempenho dos compósitos utilizados.

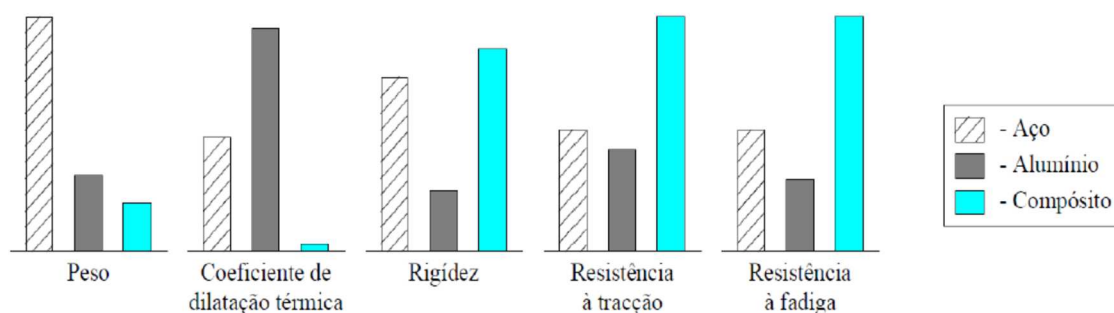


## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Polímeros reforçados com fibra

Os materiais compósitos são constituídos por uma diversidade de materiais, os quais vem sendo desenvolvidos pela engenharia. A resistência e a rigidez dos compósitos de PRF dependem do tipo de fibra, da matriz polimérica e da interface entre as mesmas, sendo que para cada um destes componentes, deve ser apresentado um conjunto de características que permita um desempenho satisfatório (HOLLOWAY, 1991 apud BEBER, 2003). A Figura 2 apresenta um gráfico comparativo das características mecânicas e físicas de um compósito qualquer, aço e alumínio. De acordo com o gráfico, o compósito possui elevada resistência à tração em relação ao aço e alumínio, assim como rigidez e à fadiga.

Figura 2 - Comparação de algumas propriedades entre aço, alumínio e material compósito de PRF.



Fonte: Taly (1998 apud JUVANDES, 2002).

Para Callister (2004) um exemplo de material compósito é a fibra de vidro, as quais são introduzidas em um material polimérico. Um material compósito é produzido através da combinação de dois ou mais materiais, resultando em um material com propriedades superiores às dos materiais que o compõe. Assim, o compósito com fibra de vidro possui a resistência do vidro e a flexibilidade do polímero.

Zucchi (2015) ressalta que as vantagens dos PRF em relação aos materiais convencionais como o aço, envolvem características como elevada resistência versus peso, elevada durabilidade em ambientes diversificados, praticidade em sua instalação e flexibilidade em formas. Com isto, os PRF podem ser considerados um avanço na tecnologia de reforço e recuperação de estruturas.

Contudo, o elevado custo destes materiais comparado com materiais convencionais com a mesma finalidade, acabam sendo um dos fatores que limitam o emprego desta técnica. Atualmente, o benefício pela utilização do PRF ocorre em situações em que suas vantagens suprem as dos materiais convencionais, o que os tornam competitivos. Essa ocorrência se dá em situações em que as condições climáticas, a interrupção no uso das estruturas e a acessibilidade acabam sendo pontos críticos (BEBER, 2003).

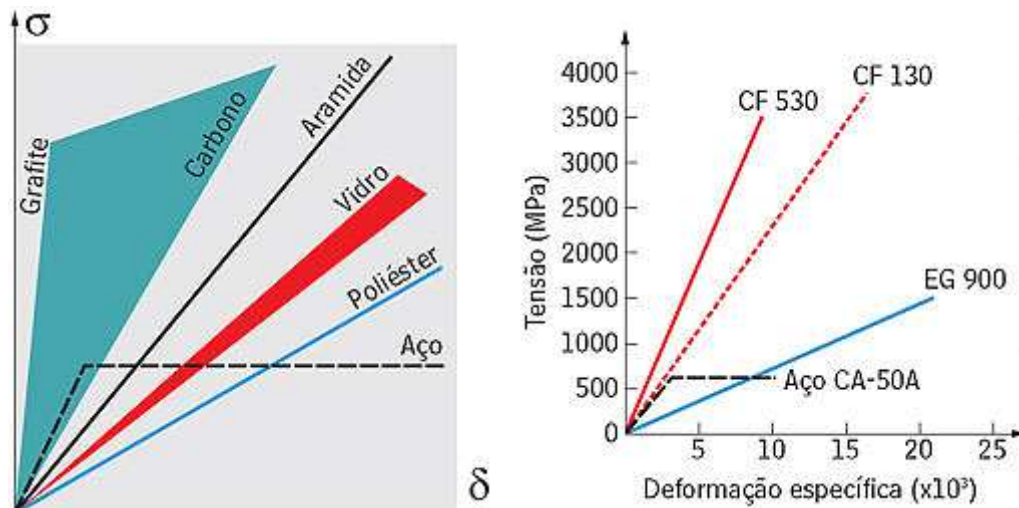
Garcez (2007) ressalta que, ao considerar os custos pelo período da vida útil das estruturas e a durabilidade oferecida por estes materiais, os mesmos acabam se tornando competitivos na maioria das situações. Com isto, a aplicação desta técnica em recuperação estrutural de uma edificação, pode minimizar o custo atribuído à mão-de-obra e custos indiretos, reduzindo o custo total em uma edificação.

Ainda, conforme Garcez (2007), o uso de fibras de alto desempenho combinadas com matrizes poliméricas, proporciona alternativas atrativas para o desenvolvimento de materiais aplicáveis no reforço estrutural em elementos de concreto armado. A escolha de fibras para formação de compósito é fundamentada na resistência, durabilidade, rigidez e comportamento ao longo do tempo.

De acordo com Machado (2012), atualmente as fibras mais utilizadas no reforço de polímeros, são as fibras de carbono, vidro e aramida, embora outras fibras já tenham sido utilizadas. Na Figura 3 é possível fazer um comparativo de alguns

materiais com o carregamento e sua deformação, destacando-se os materiais compósitos. Contudo, este trabalho terá como estudo as fibras de vidro e aramida.

Figura 3 - Comparação de algumas propriedades entre aço, alumínio e material compósito de PRF.



Fonte: Machado (2012).

Diante da importância das características dos materiais empregados na execução dos reforços, a seguir serão apresentadas as principais propriedades das fibras de aramida e vidro.

## 2.2 Propriedades dos compósitos

### 2.2.1 Fibra de Aramida

Segundo Callister (2002), no início da década de 1970 empregou-se o uso das fibras de aramida, pois apresentavam alta resistência e alto módulo de elasticidade, sendo um material desejável pela sua relação resistência-peso em relação às apresentadas pelos metais. A fibra de aramida é uma fibra sintética, altamente orientada e composta por um polímero semicristalino conhecido como poliamida aromática, que é produzida por meio do processamento de fiação por fusão, cuja fibra sólida é tecida a partir de uma mistura química líquida, passando por uma fieira de pequenos orifícios. Durante a síntese, as moléculas rígidas são alinhadas longitudinalmente ao eixo das fibras, como domínio de cristal líquido.

As fibras de aramida geralmente possuem coloração amarelada conforme Figura 4, com baixa densidade e em relação a estruturas são não condutivas, sendo classificadas como para-aramidas (GARCEZ, 2007).

Figura 4 - Compósito de fibra de aramida



Fonte: Da autora (2018).

As fibras para-aramidas possuem excelente resistência, sendo cinco vezes mais fortes que o aço com o mesmo peso, alta rigidez (flexão), dificultando o seu corte ou desgaste, resistente a solventes orgânicos e degradação térmica. As para aramidas possuem boa resistência à combustão, mantendo suas propriedades mecânicas intactas até o patamar de 200°C (CALLISTER, 2002).

### 2.2.2 Fibra de vidro

De acordo com Silva (2014), as fibras de vidro possuem uma estrutura amorfa compostas basicamente por sílica, possuindo diversos outros óxidos como óxidos de cálcio, de boro, de sódio, de alumínio e de ferro. As fibras são produzidas a partir de diferentes composições químicas e, portanto, possuem diferentes propriedades mecânicas e químicas. A temperatura de fusão depende da composição, aproximando-se dos 1260°C. As fibras de vidro são submetidas a tratamentos superficiais, que variam de acordo com sua aplicação.

Os tecidos de fibra de vidro bidirecionais são produzidos com vidro tipo E, que segundo Silva (2014) é um vidro borosilicato com baixas quantidades de compostos alcalinos. Essa fibra é predominante em compósitos de matriz polimérica em função

das suas elevadas propriedades de isolamento elétrico, boa resistência à umidade e elevadas propriedades mecânicas como à flexão e tração do laminado.

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades de compósitos com matriz de epóxi reforçados com fibras contínuas e alinhadas de vidro, carbono e aramida, nas direções transversal e longitudinal, com uma fração volumétrica de fibra em 0,60 (CALLISTER, 2002).

Tabela 1 - Propriedades compósitos reforçados com fibras de vidro, carbono e aramida.

	Vidro	Carbono	Aramida
Propriedade	[Vidro E (E-Glass)]	(Alta Resistência)	(Kevlar 49)
Densidade Relativa	2,1	1,6	1,4
Módulo de Tração			
Longitudinal [Gpa ( $10^6$ psi)]	45 (6,5)	145 (21)	76 (11)
Transversal [Gpa ( $10^6$ psi)]	12 (1,8)	10 (1,5)	5,5 (0,8)
Limite de resistência à tração			
Longitudinal [Mpa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transversal [Mpa (ksi)]	40 (5,8)	41 (6)	30 (4,3)
Deformação no limite de resistência à tração			
Longitudinal	2,3	0,9	1,8
Transversal	0,4	0,4	0,5

Fonte: Da autora, adaptado de Callister (2002).

### 2.2.3 Processos de fabricação das fibras

O grupo de pesquisa Virtuhab (UFSC) no qual consiste em agregar subprojetos de caráter interdisciplinar, descreve o processo de fabricação das fibras sintéticas conforme os passos descritos abaixo:

- a) procedimento químico a fim de arranjar e combinar os elementos com a fibra. Denominado de polimerização, trata-se da formação de macromoléculas pela repetição de unidades básicas. Neste processo, tem-se a conversão dos componentes sólidos em um líquido viscoso, para então serem extrudados em fibras;

- b) o processo de fabricação da fibra ocorre pela passagem do líquido por uma fieira com diversos furos de diâmetros específicos que determinam o tamanho do filamento que será produzido;
- c) a seguir é feito um processo de torção que transforma o filamento de fibra em um fio. O filamento cai verticalmente do dispositivo e vai para um “bocal de vácuo”, onde a força do vácuo mantém a tensão em linha como se fosse enrolada em torno de uma bobina. Por fim o fio é torcido, empacotado e levado para um moedor.

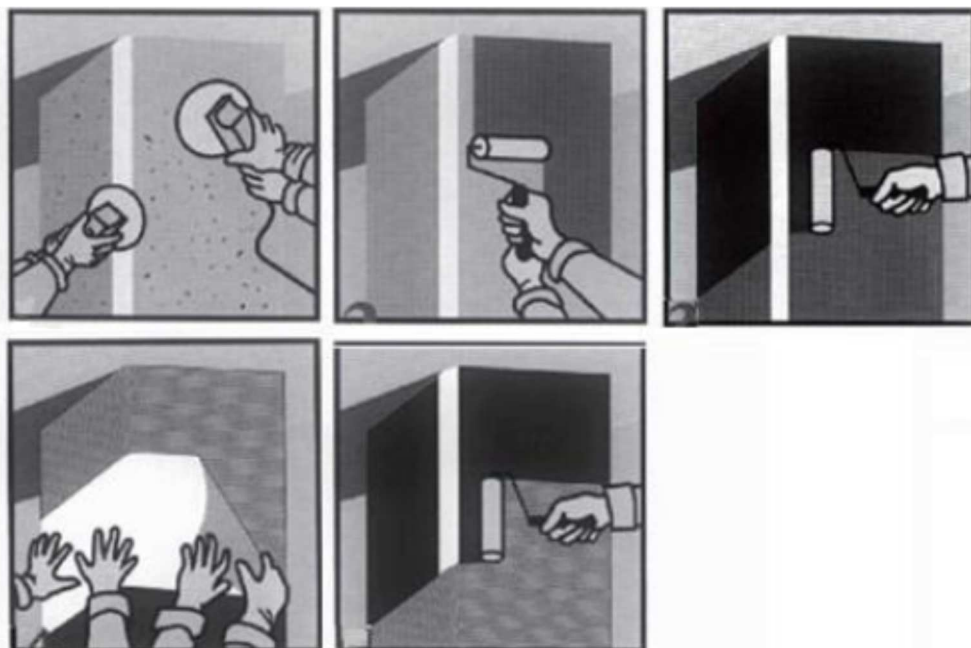
#### **2.2.4 Aplicação do reforço estrutural**

Para a aplicação do compósito reforçado com fibra deve-se seguir uma correta sequência conforme apresentada na Figura 5, a fim de garantir a eficiência da técnica a ser aplicada. A seguir será apresentada as recomendações gerais para a aplicação do reforço, devendo sempre seguir as recomendações específicas do fabricante.

- a) preparar o substrato, devendo estar livre das partículas soltas, limpo e livre de impregnações, como óleos, graxas, nata de cimento, ferrugens, entre outros. O substrato deverá ser lixado a fim de obter uma superfície porosa, criando uma ponte de aderência;
- b) a superfície recebe uma imprimação com uma resina epóxi bi componente cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 2, para cobrir a porosidade do concreto, promovendo uma aderência adequada no substrato e prepará-lo para receber as próximas etapas;
- c) será realizado o estucamento da superfície a fim de eliminar suas imperfeições, de modo a torná-la mais nivelada, para isso é utilizada uma resina epóxi bi componente, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 03, aplicada com o auxílio de uma espátula;
- d) para a aplicação da fibra deverá ser aplicada a resina epóxi bi componente cujas propriedades estão dispostas na Tabela 04, com o auxílio de um rolo de lã, com uma camada aproximadamente de 0,25 kg/m<sup>2</sup>. Passados alguns

minutos a manta é aplicada sobre o material em estado plástico. A fibra é pressionada firmemente contra a superfície por meio de um rolo com ranhuras metálicas apropriado, no sentido longitudinal da fibra até sua perfeita aderência. Passados aproximadamente 40 minutos, será aplicada uma nova camada da resina com o mesmo consumo anterior, para fazer a proteção das fibras.

Figura 5 - Sistema de aplicação dos tecidos reforçados com fibra



Fonte: Souza e Ripper (1998).

Tabela 2 - Resina Epóxi bicomponente - imprimação.

Caraterística	Especificação	Unidade
Cura final	7	dias
Secagem ao toque	de 8 a 12	horas
Resistência à aderência	> 2	Mpa
Temperatura de aplicação	10 a 30	° C
Pot life	20 a 50	Minutos

Fonte: Da autora, adaptado de Machado (2012).

Tabela 3 – Resina epóxi bicomponente – estucamento

<b>Característica</b>	<b>Especificação</b>	<b>Unidade</b>
Densidade (A+B)	1,45	g/cm <sup>2</sup>
Resistência à aderência	> 2	MPa
Secagem ao toque 25°C	2	Horas
Pot life	40 a 50	Minutos
Relação de mistura (P1:P2)	03:01	Volume

Fonte: Da autora, adaptado de Machado (2012).

Tabela 4 – Resina epóxi bicomponente – aplicação da fibra

<b>Característica</b>	<b>Especificação</b>	<b>Unidade</b>
Pot life – 20 °C	Aproximadamente 40	minutos
Temo de secagem ao toque	< 11	Horas
Cura total	7	Dias
Relação de mistura (P1:P2)	02:01	n/a
Viscosidade	5000	Cps
Resistência à tração	29	Mpa
Resistência à compressão	68	Mpa
Módulo de compressão	1470	Mpa
Resistência ao cisalhamento	9,8	Mpa

Fonte: Da autora, adaptado de Machado (2012).

### 2.3 Formação das fissuras

A razão pela qual as peças de concreto fissuram com tensões de tração pequenas, se dá pela baixa resistência à tração do concreto. Segundo Leonhardt (2012), além das tensões devido às cargas, também há atuação de tensões de tração derivadas de esforços de coação internos ou externos, que sob condições de temperatura e umidade do ar desfavoráveis, são capazes de atingir valores tão



elevados, fazendo com que o concreto fissure antes mesmo da atuação do carregamento.

Ainda, segundo Leonhardt (2012), o risco de fissuração ocorre entre as primeiras dez a quarenta horas da concretagem, pois o concreto ainda novo possui baixa resistência à tração, estando, portanto, sujeito a tensões intrínsecas ou até mesmo tensões de coação elevadas, em função da variação de temperatura, por exemplo, a retirada prematura das fôrmas e juntamente com vento frio noturno, irá provocar tensões de tração nas camadas externas da peça.

### **2.3.1 Contração plástica do concreto**

Para Trindade (2015), em estruturas de concreto armado, a contração plástica é na maioria das vezes o primeiro dos casos a gerar fissuras no elemento estrutural, ocorrendo antes mesmo da pega do concreto. Este processo ocorre pela rápida evaporação da água em relação à taxa de água que foi exsudada, não havendo relação com o comportamento reológico do concreto, assim, a massa do concreto se contrai de forma irreversível logo após o seu lançamento.

De acordo com o Instituto Brasileiro do Concreto (KIMURA, 2007), a retração hidráulica que surge nas primeiras horas após a concretagem, acusa falhas no processo de cura. A retração é decorrente das reações químicas entre o cimento e a água, através da redução do volume das moléculas.

A fim de melhorar ou alterar alguma característica do concreto, é comum realizar adições ao cimento. As adições que contribuem para a não ocorrência de retração plástica são as pozolanas, sílica ativa, metacaulim, cinza da casca de arroz, cinza volante, escórias granuladas de alto-forno e também de fíller calcário (MARIN; BRASIL, 2016).

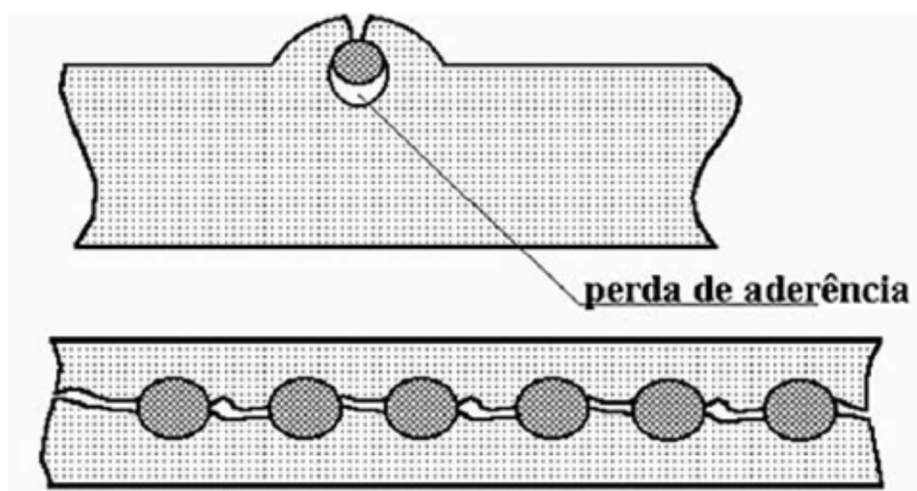
### **2.3.2 Perda de aderência das barras da armadura/assentamento do concreto**

Durante o processo de concretagem, haverá a acomodação do mesmo pela ação natural devido à gravidade, nos casos em que a passagem do concreto for

impedida devido ao espaçamento mínimo entre as barras, resultará na formação da fissura. Quanto mais espessa a camada do concreto, maior será a fissura (TRINDADE, 2015).

Segundo Souza e Ripper (1998), a formação de fissuras por assentamento, acompanha o desenvolvimento da armadura criando a formação de sombra, a qual consiste na formação de um vazio na parte inferior da barra, reduzindo sua aderência com o concreto conforme demonstrado na Figura 6. Quando houver um agrupamento maior das barras, as fissuras poderão interagir entre si, podendo resultar em situações agravantes como perda total da aderência.

Figura 6 - Formação de fissuras por assentamento plástico do concreto



Fonte: Souza e Ripper (1998).

### 2.3.3 Movimentação de fôrmas e escoramento

As fôrmas são responsáveis por delimitarem a geometria dos elementos estruturais e sua movimentação pode ser ocasionada por diversos motivos: falta de travamento no escoramento, espessura da fôrma inadequada para dimensão e volume da peça, juntas mal vedadas, mau posicionamento, entre outros (TRINDADE, 2015).

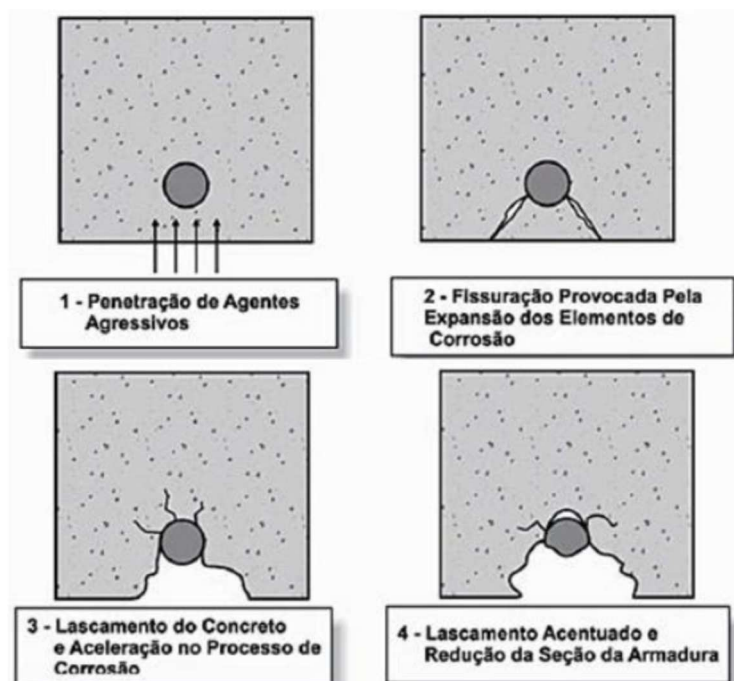
De acordo com Souza e Ripper (1998) a movimentação da peça altera sua geometria, acarretando na perda de resistência mecânica, fissuração da peça ou deformação acentuada da mesma.

### 2.3.4 Corrosão das armaduras

A corrosão da armadura é um processo de deterioração da camada passivante localizada ao redor da superfície das barras, com a ação química ou eletroquímica do meio ambiente, contendo ou não esforços mecânicos. Essa camada é formada pelo impedimento da dissolução do aço, em função da elevada alcalinidade da solução aquosa existente no concreto (SOUZA; RIPPER, 1998).

Segundo Marcelli (2007), o momento em que as condições de serviço se alteram e o concreto se modifica através da penetração de substâncias agressivas, ocorre o rompimento da película passivante e inicia-se o processo de corrosão das armaduras. A corrosão gera óxidos expansivos, que ocupam um volume maior em relação ao volume do aço original, acarretando do destacamento da camada de cobrimento, permitindo o ingresso de mais agentes agressivos prejudicando ainda mais as armaduras e o concreto. A Figura 7 ilustra os passos do processo de corrosão da armadura.

Figura 7 - Processos do mecanismo de corrosão das armaduras



Fonte: Marcelli (2007).

Conforme Souza e Ripper (1998), é imprescindível que na fase de projeto, seja realizada a análise do ambiente no qual a estrutura será inserida, e de todas as

possíveis ações de degradação que a estrutura estará exposta. As normas em vigor descrevem que a classe de agressividade do meio ambiente está diretamente ligada às ações químicas e físicas atuantes na estrutura de concreto, conforme disposto pela Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação da agressividade em relação ao ambiente

<b>CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL (CAA)</b>			
Classe	Agressividade	Classificação do tipo de ambiente	Risco de deterioração
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana Marinha	Pequeno
III	Forte	Industrial	Grande
IV	Muito Forte	Respingos de maré	Elevado

Fonte: Da autora, adaptado de NBR 6118 (2014).

## 2.4 Fissuras em viga por flexão

Segundo Trindade (2015), as fissuras em vigas de concreto armado se caracterizam por serem perpendiculares à linha de tração da estrutura, sendo maiores e mais acentuadas tanto quanto maior for o esforço de tração e tanto quanto maior for a insuficiência da armadura.

Essas fissuras são praticamente verticais no terço médio do vão, possuindo abertura maior na face em que a peça está sendo flexionada, que, ao se aproximarem da linha neutra diminuem de tamanho, até desaparecerem na zona de compressão. Quando próximas aos apoios, as fissuras aparecem com uma inclinação de 45° com o eixo horizontal, devido ao esforço cortante (LEONHARDT, 2012).

## 2.5 Estado Limite de Serviço de abertura de fissuras em seções de concreto armado submetidas à flexão simples

Para Leonhardt (2012), a classe de agressividade ambiental na qual a estrutura se encontra e a abertura das fissuras, são fatores determinantes para que se possa garantir a durabilidade e vida útil de uma estrutura.

Conforme descrito no item 17.3.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014), a formação de fissuras pode ser conferida pela máxima tensão de tração do concreto no Estágio I (comportamento elástico linear), atingindo a resistência do concreto à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ), tal ocorrência se dá quando o momento de serviço atingir o momento de fissuração. Utilizando a expressão do item 17.3.1 da NBR 6118 é calculado o momento de fissuração segundo Equação 1:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{Y_t} \quad (1)$$

onde:

$I_c$  - momento de inércia da seção bruta do concreto;

$y_t$  - distância da linha neutra à fibra mais tracionada da seção;

$f_{ct}$  - resistência direta do concreto à tração, que no caso do estado limite de formação de fissuras, e de acordo com o item 17.3.1 da NBR 6118, deve ser igualada à resistência característica inferior do concreto à tração  $f_{ctk,inf}$ ;

$\alpha$  - é um parâmetro que transforma a resistência à tração direta em resistência à tração na flexão.

Com o momento de fissuração  $M_r$  conhecido, é realizada a comparação com o momento de serviço  $M_{d,ser}$ , para então determinar a possibilidade de fissuração da viga. Nos casos em que houver fissuração, sua abertura deverá ser controlada para que seja inferior ao especificado no estado limite de abertura de fissuras.

A importância no controle da abertura de fissuras se dá para obter um bom desempenho e proteção das armaduras, tendo em vista que a corrosão é a manifestação patológica com maior ocorrência em estruturas de concreto armado.

O valor da abertura das fissuras não deve ultrapassar os limites admissíveis, estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), em função da agressividade do ambiente, na ocorrência deste, atinge-se o estado limite de abertura das fissuras. A utilização normal aqui citada se refere à edificação servir para o seu uso previsto. A abertura limite é dada em função da classe de agressividade ambiental do meio, conforme apresentado pela Tabela 6.

É possível estabelecer limites de fissuras mais severos do que indicado pela norma, ficando a critério do proprietário, o qual deverá considerar aumentos significativos ao custo da estrutura.

Tabela 6 – Exigência relativas à fissuração em relação a classe de agressividade

<b>Tipo de concreto estrutural</b>	<b>Classe de Agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão</b>	<b>Exigências relativas à fissuração</b>	<b>Combinação de ações em serviço a utilizar</b>
Concreto Simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto Armado	CAA I	ELS-W wk $\leq$ 0,4 mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W wk $\leq$ 0,3 mm	
	CAA IV	ELS-W wk $\leq$ 0,2 mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W wk $\leq$ 0,2 mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS	Combinação frequente

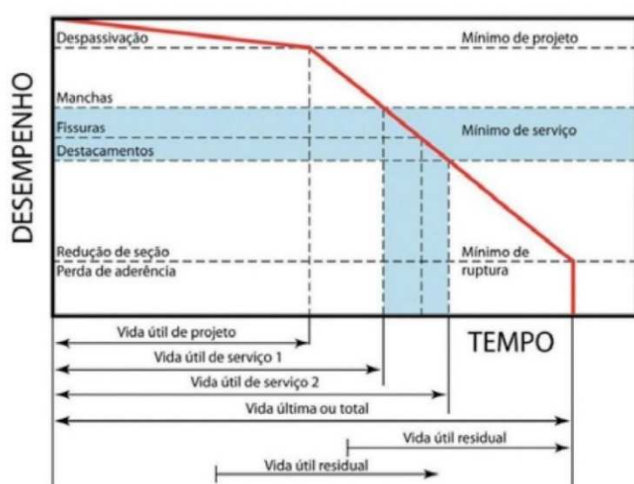
Fonte: Da autora, adaptado de NBR 6118 (2014).

As fissuras que respeitam os limites estabelecidos por norma, em estruturas de concreto armado bem projetados, construídas e submetidas às cargas permanentes e sobrecargas previstas, não acarretarão em perda da funcionalidade, durabilidade ou segurança quanto aos estados limite últimos (CLÍMACO, 2015).

## 2.6 Vida útil de projeto

Conforme descrito pelo Ibracon (2007), a vida útil de projeto se refere como o período no qual uma estrutura irá desempenhar bem as funções para a qual foi projetada, podendo distinguir três situações e suas correspondentes vidas úteis, conforme apresentado pela Figura 8.

Figura 8 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto



Fonte: HELENE (1997)

Com base na figura apresentada, Helene (1997) define que a vida útil de projeto é o período que atinge a despassivação da armadura e corresponde ao tempo necessário para que a frente de carbonatação ou de cloretos, atinja a armadura. Na fase da despassivação não haverá necessariamente uma significativa corrosão da armadura, esse período, no entanto, deverá ser adotado na fase de projeto a favor da segurança.

No entanto, a vida útil de serviço refere-se ao período até o surgimento de manchas na superfície do concreto, fissuras no concreto de cobrimento e até o destacamento deste. Cada caso é variável em função do uso da estrutura.

Ainda segundo Helene (1997), o período que alcança a ruptura parcial ou total de uma estrutura, corresponde ao período no qual há uma redução significativa da seção resistente da armadura ou até mesmo perda da aderência entre concreto e armadura, resultando no colapso total ou parcial da estrutura.

## 2.7 Métodos de reforço estrutural

Segundo Trindade (2015), os reforços em estruturas de concreto armado tem por objetivo aumentar a capacidade portante de determinada estrutura, ou até mesmo regenerar a mesma devido sua perda pela incidência de manifestações patológicas ou mudança da utilização na estrutura.

Atualmente, existem diversos métodos de reforço para estruturas de concreto armado, que envolvem técnicas e materiais distintos. A escolha do método a ser empregado deve ser motivada pela disponibilidade de material e mão de obra no mercado e os conhecimentos do projetista envolvido (BATTISTI, 2017).

A seguir serão apresentados os seguintes métodos: reforço fazendo o uso de perfis ou chapas metálicas, reforço mediante aumento da seção transversal e reforço com polímeros acrescidos de fibras.

### 2.7.1 Reforço com perfis ou chapas metálicas

Nos casos em que for necessário acrescentar capacidade resistente, principalmente em situações que requerem emergência ou que não seja possível grandes alterações na geometria da peça, uma opção eficiente e de rápida execução é a do reforço externo por colagem ou chumbamento de chapas metálicas ou chumbamento de perfis com a adição de resinas injetadas (RIPPER, 1998). A Figura 9 ilustra os dois métodos de reforço.

Figura 9 - Reforço por colagem e chumbamento de perfis metálicos



Fonte: RIPPER, 1998.

De acordo com Reis (2001), no processo de reforço com a adição de adesivo, se faz necessário o alívio das cargas atuantes na estrutura, remoção da camada degradada e obtenção de uma superfície uniformemente rugosa, a fim de aumentar a aderência química entre as partes, devendo atentar-se à umidade da região a ser aplicada, pois a utilização de adesivo epóxi requer que não haja elevada umidade. Nos casos em que houver fissuras na superfície do concreto, estas deverão ser seladas antes da aplicação do reforço, a fim de impedir a fuga da resina.



Com a superfície preparada e a chapa estando em condições de ser colada, deverá ser tomado o cuidado com a correta posição das peças. Após a fixação, as chapas deverão ser submetidas a uma ligeira pressão uniforme, para que as resinas em excesso sejam expulsas. Mesmo nos casos de colagem, é feita a introdução de chumbadores na extremidade de ancoragem das chapas, os quais terão a contribuição mecânica na transferência de esforços (RIPPER, 1998).

Para a aplicação de chumbadores, o método de preparo da superfície, é o mesmo que o descrito anteriormente, sendo que a diferença do sistema consiste na aplicação de chumbadores normalmente com buchas expansivas, e somente após o aperto será feita a injeção de resina, fazendo o preenchimento do vazio entre o concreto e o aço.

### **2.7.2 Reforço com aumento da seção transversal**

O reforço com o aumento da seção transversal consiste na adição de novas armaduras e concreto, conforme apresentado pela Figura 10. Essa técnica é mais simples do que aquelas que necessitam de adição de outro material como por exemplo, chapas metálicas, compósitos reforçados com fibras, tirantes, entre outros.

Figura 10 - Reforço com adição de armadura em viga



Fonte: ZUCCHI, 2015.

Os materiais utilizados para este reforço são o concreto e as barras de ferro, tornando o método mais econômico. Em contrapartida, em alguns casos essa técnica acaba se tornando inviável em função da interferência arquitetônica do aumento da

seção dos elementos reforçados, além dos casos em que o tempo é prolongado para que a estrutura possa ser liberada para uso. Reis (2001) sugere a utilização do concreto de alto desempenho como uma alternativa ao invés do concreto convencional, resultando em espessuras menores, não sendo necessárias alterações significativas nas dimensões dos elementos reforçados.

De acordo com Zucchi (2015), para garantir a eficiência desta técnica, é necessário garantir a aderência do concreto novo ao concreto velho e sua capacidade de transferência das tensões. Para isto são necessários cuidados para a limpeza da superfície e armaduras antes da aplicação do novo material. Esta aderência pode ser melhorada com a utilização de adesivo a base de epóxi na superfície preparada.

Na maioria dos casos, a armadura apresenta a condição de corrosão, sendo necessário também o tratamento das armaduras, fazendo a remoção da corrosão com lixamento. Segundo Reis (2001), uma alternativa de proteção das armaduras contaminados com cloretos, é a pintura das armaduras com primer epóxi com zinco, recomendado também para passivação e proteção das armaduras contra corrosão em reparos e reforços estruturais.

### **2.7.3 Reforço com polímeros reforçados com fibras**

A tecnologia de reforço em estruturas de concreto com a utilização de compósitos teve alguns ajustes importantes e desenvolvimento após a ocorrência do sismo de Kobe, em 1995. Sendo mais um passo evolutivo na história da construção civil, em busca por tecnologias simples, resistentes e duráveis, para a reabilitação de estruturas de concreto, ultrapassando as tecnologias tão distintas quanto o aumento de seções pela aplicação de concreto projetado e pelo reforço através de chapas de aço colada ao concreto (RIPPER, 1998).

Segundo Ripper (1998), a utilização de PRF em elementos de concreto como alternativa ao aço, teve início em meados do século XIX. A substituição das barras de aço pelos PRF como armadura para o concreto tem sido restrita em situações específicas para ambientes em que o emprego do aço não seja admissível, como a ocorrência de fenômenos como a ressonância magnética.

O desempenho do reforço da estrutura dependerá diretamente da qualidade de aplicação do produto sobre a superfície do elemento. Assim, esse processo pode ser dividido em duas etapas, a de preparo da superfície receptora e a aplicação do compósito propriamente dito. Para a aplicação desse sistema de reforço, segue-se os procedimentos descritos anteriormente no item 2.2.4.

Os polímeros reforçados com fibras consistem em uma técnica extremamente versátil de reforço estrutural, podendo ser aplicadas em diversas estruturas e fabricadas nas mais diversas formas.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

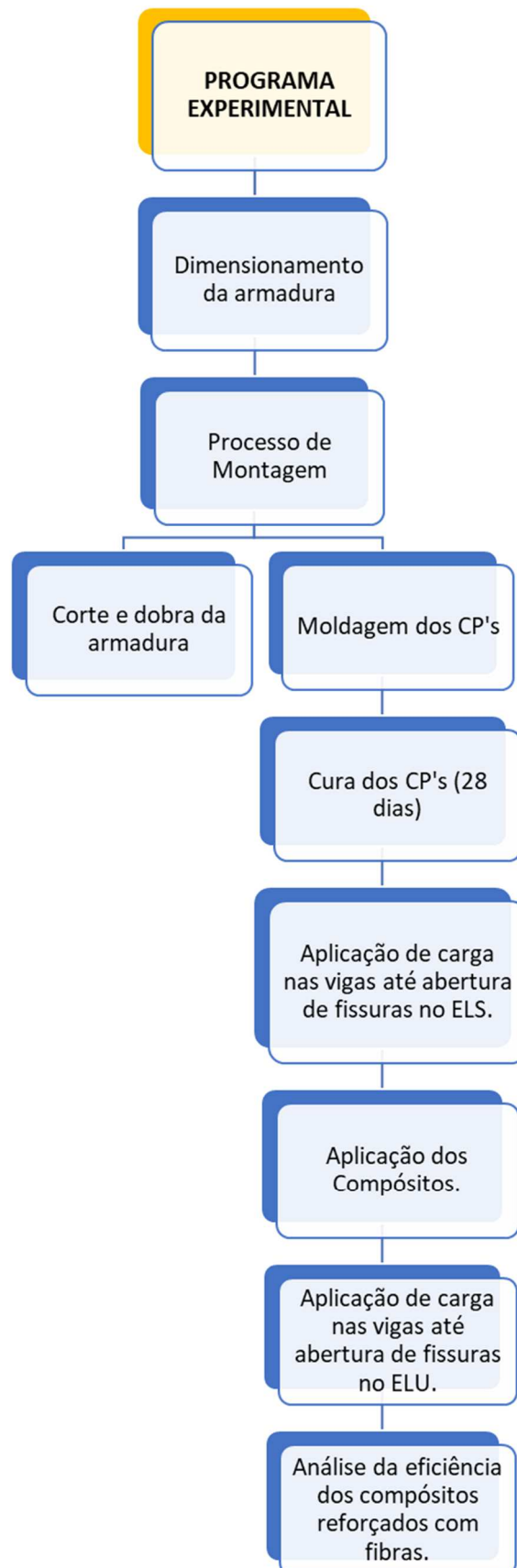
O objetivo do programa experimental deste trabalho compreende a avaliação do comportamento de vigas em concreto armado de seção retangular, sendo esta mais comumente utilizada nas edificações, reforçadas com compósitos de fibra de vidro e fibra de aramida.

As atividades práticas deste trabalho foram desenvolvidas inteiramente no Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC) da própria Universidade. A etapa de cura dos corpos de provas moldados ocorreu no próprio laboratório da Universidade em uma câmara com controle de umidade

O trabalho propõe-se essencialmente, ser benéfico como solução no reparo/reforço em vigas que apresentarem problemas estruturais como deformação e abertura de fissuras dentro de seu estado limite de serviço, durante o período de sua vida útil.

As etapas do programa experimental seguirão os tópicos descritos pelo fluxograma apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Da autora (2018).

### 3.1 Programa experimental

O método de pesquisa consiste na realização de ensaios com vigas que correspondem a uma escala reduzida em relação a vigas próximas as da realidade, no laboratório da própria Universidade. No total foram ensaiados 9 corpos de prova prismáticos, cujas medidas transversais são de 10 x 15 cm e comprimento de 100 cm, sendo estes separados em três diferentes grupos, Grupo 1, Grupo 2 e Grupo 3, com aplicação distinta entre eles.

O Grupo 1 consiste em 3 corpos de prova identificados como 1a, 1b e 1c reforçados à flexão com uma camada de fibra de aramida, aplicada na parte inferior da viga a fim de reforçar o elemento aos esforços à flexão, gerado pelo momento positivo, sendo resultante pelos esforços aplicados por uma carga calculada, pelo método de carregamento de pontos aplicado na parte superior da viga.

O Grupo 2 consiste em 3 corpos de prova identificados como 2a, 2b e 2c reforçados à flexão com uma camada de fibra de vidro, aplicada na parte inferior da viga, sob os mesmos efeitos das peças do Grupo 1.

O Grupo 3 consiste em 3 corpos de prova, sem aplicação de reforço, os quais serão ensaiados a fim de aferir a resistência real da peça sem a interferência do reforço.

A aplicação do reforço à flexão está sendo ilustrada pela Figura 12.

Figura 12 - Aplicação do reforço à flexão



Fonte: Da autora (2018).

## 3.2 Materiais

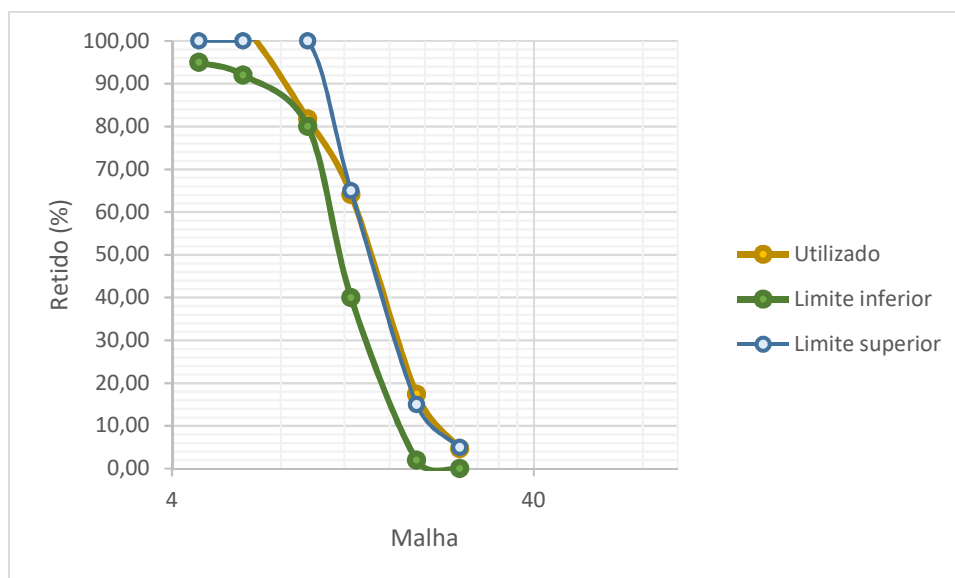
Este item consiste em descrever os materiais que foram utilizados para a execução dos elementos reforçados na presente pesquisa.

### 3.2.1 Brita

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), agregados graúdos são classificados como grãos passantes pela peneira cuja malha possui abertura de 75 mm e ficam retidos na peneira de malha 4,75 mm. A brita utilizada para composição do concreto é do tipo pedra basáltica de número 1, com dimensão máxima característica de 19 mm.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a dimensão máxima dos agregados não pode ser superior a 20% da espessura de cobrimento da peça ( $d_{m\acute{a}x} \leq 1,2c_{ob}$ ), assim será adotado cobrimento igual a 20 mm, sendo válida a relação de  $19 < 24$  mm. A Figura 13 apresenta a curva granulométrica do agregado utilizado.

Figura 13 - Curva granulométrica agregado graúdo

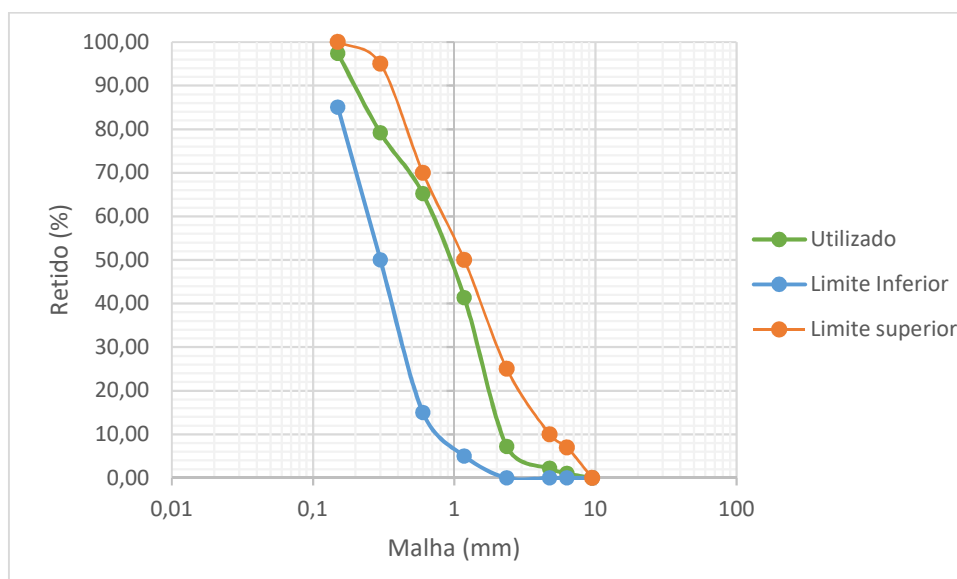


Fonte: Da autora (2018).

### 3.2.2 Areia

Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2005), o agregado miúdo é considerado como o material passante pela peneira com abertura da malha em 4,75 mm. A areia utilizada para composição do concreto é de base quartzítica com origem de jazida do Rio Taquari com dimensão máxima de 4,75 mm, comercialmente conhecida como “grossa”. A Figura 14 apresenta a curva granulométrica do agregado utilizado.

Figura 14 - curva granulométrica agregado graúdo



Fonte: Da autora (2018).

### 3.2.3 Cimento

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o Cimento Portland com alta resistência inicial (CP V-ARI), que é utilizado nos casos em que há a necessidade de ganho de resistência em um curto período, demandando menor tempo de cura. A escolha do material se deu pelo fato do mesmo ter maior disponibilidade no mercado e pelas suas características de desempenho, as quais estão sendo apresentadas pela Tabela 7 de acordo com a NBR 5773 (ABNT, 1991).



Tabela 7 – Características do CP V ARI

<b>Características físicas e mecânicas CP V ARI</b>		
Propriedades	Unidade	Classe 25
Finura (75µm)	%	≤ 6,0
Tempo início de pega	hora	≤ 1
Expansabilidade	mm	≤ 5
Resistência	MPa	≥ 14,0
	MPa	≥ 24,0
	MPa	≥ 34,0

Fonte: Da autora, adaptado de NBR 5733 (1991).

### 3.2.4 Aço

Para o desenvolvimento do presente trabalho utilizou-se barras de aço cuja fabricação se dá pelo processo de laminação a quente, com bitolas iguais ou superiores a 5,0 mm e com resistência ao escoamento de 500 e 600 MPa, ou seja, classes de CA-50 e CA-60, respectivamente. As características específicas de cada bitola estão sendo apresentadas na Tabela 8, conforme dados do fabricante.

Tabela 8 – Características do aço

<b>Características do aço</b>				
	Diâmetro nominal DN (mm)	Massa nominal (kg/m)	Resistência Característica de escoamento (fy) (Mpa)	Diâmetro do pino para dobramento a 180° (mm)
<b>CA-60</b>	4,20	0,109	600	5 x DN
	5,00	0,154		
	6,00	0,222		
	8,00	0,395		
<b>CA-50</b>	10,00	0,617	500	3 x DN
	12,50	0,963		
	16,00	1,578		

Fonte: Da autora, adaptado de Gerdau.

### 3.2.5 Polímero reforçado com fibra de vidro

Para aplicação do reforço foi utilizado o tecido flexível bidirecional RE200P, produzido por Barracuda Advanced Composites utilizando uma trama plana

produzindo um laminado altamente resistente com 50% das fibras orientadas a 0° e 50% das fibras orientadas a 90°. As principais características estão apresentadas na Tabela 9, de acordo com as especificações do fabricante.

Tabela 9 – Características do tecido de fibra de vidro

<b>RE200P</b>		
Característica	Especificação	Unidade
Gramatura	200	g/m <sup>2</sup>
Espessura	0,21	mm
Resist. Tração Trama	50	kgf/cm
Resist. Tração Urdume	50	kgf/cm

Fonte: Da autora, adaptado de E-Compósitos (2018).

### 3.2.6 Polímero reforçado com fibra de aramida

Para a aplicação do reforço foi utilizado o tecido flexível bidirecional AR-0178, produzido pela Fibertex® com padronagem de tela 1x1 direcionadas 50% longitudinal e 50% transversal. As principais características estão apresentadas na Tabela 10, de acordo com as especificações do fabricante.

Tabela 10 – Características do tecido de fibra de aramida

<b>AR - 0178</b>		
Característica	Especificação	Unidade
Gramatura	178	g/m <sup>2</sup>
Espessura	0,25	mm
Resist. Tração Trama	35	kgf/cm
Resist. Tração Urdume	35	kgf/cm

Fonte: Da autora, adaptado de Fibertex (2014).

### 3.3 Dimensionamento

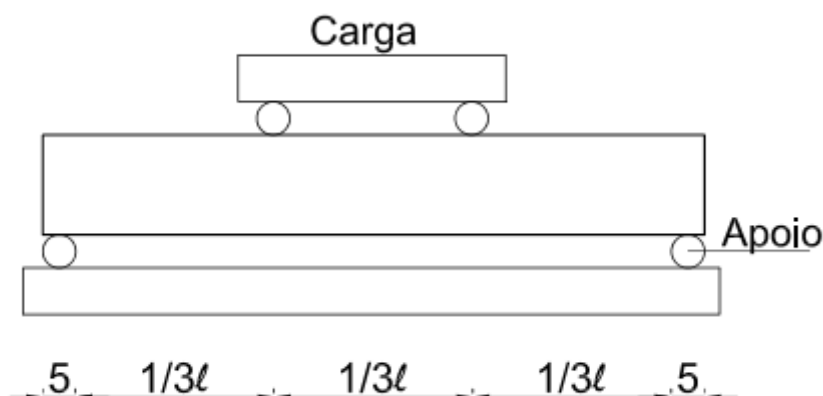
Para o dimensionamento das armaduras, seguiu-se o dimensionamento realizado por Battisti (2017) com algumas alterações, tendo em vista que o método experimental se deu na própria instituição, a qual dispõe de equipamentos de ensaio

que estão limitados a altura livre de ensaio. Ainda, as vigas foram dimensionadas sem considerar coeficientes de segurança para o carregamento, sendo estes baseados nas propriedades reais dos materiais.

Os corpos de provas ensaiados a flexão tiveram taxa de armadura longitudinal mínima e armadura transversal superdimensionada, a fim de evitar a influência de sua ruptura através dos esforços aplicados.

Na concepção estrutural utilizada, adotou-se o ensaio de flexão a quatro pontos ilustrado pela Figura 15, no qual, de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010), o vão inferior é apoiado em suas extremidades possuindo um vão “L”, e para a parte superior o vão entre apoios será de “L/3”, pois a formulação deste ensaio assume que existe um estado de flexão pura, desconsiderando quaisquer outras tensões que possam surgir pela existência de um carregamento concentrado sobre o corpo.

Figura 15 - Ensaio de flexão a quatro pontos



Fonte: Da autora (2018).

### 3.3.1 Armadura à flexão

De acordo com Battisti (2017) na determinação do carregamento necessário bem como o cálculo das armaduras necessárias, priorizou-se trabalhar próximo aos limites de deformação de domínio 2-3, cuja seção resistente passa de ser subarmada, sendo que no domínio 2 a peça acaba trabalhando com o concreto comprimido e o aço tracionado, enquanto no domínio 3 a ruptura do concreto ocorre simultaneamente com o escoamento do aço.

Para o dimensionamento das armaduras, considerou-se as seguintes informações em relação às características dos materiais.

- a) seção do elemento: 10x15 cm, as medidas foram adotadas a partir da limitação do aparelho de ensaio, o qual possui limitação em sua altura, e levando em consideração a seção 13.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), que diz que os limites da seção transversal das vigas podem ser reduzidas, respeitando-se um mínimo de 10 cm em casos excepcionais, respeitando os espaçamentos e cobrimentos estabelecidos pela norma;
- b) cobrimento nominal: 20 mm, admitindo que para a moldagem dos corpos de prova haverá um controle adequado de qualidade durante sua execução, considerou-se a classe de agressividade ambiental I, sendo que para estes casos a NBR 6118 (ABNT, 2014) permite a redução do cobrimento nominal em 5 mm conforme descrito na seção 7.4.7.4 da referida norma.
- c) resistência do concreto:  $F_{ck}$  de 30 MPa, sendo que a NBR 6118 estabelece um  $F_{ck}$  de 25 MPa como mínimo, para que seja considerado um concreto estrutural;
- d) armadura: Aço CA-50 (500 MPa).

A partir dos dados apresentados acima, é possível proceder com o dimensionamento da viga.

Utilizou-se a Equação 2, para trabalhar com a linha neutra dentro do limite do domínio 2-3:

$$X_{23} = 0,259 \times d \quad (1)$$

onde:

$x$  = altura da linha neutra na seção.

$d$  = altura útil, distância entre o centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada até a fibra mais comprimida de concreto.  $d = 0,121$  m, considerando cobrimento de 20 mm, estribo de 5 mm e armadura longitudinal de 8 mm.

Tem-se:

$$X_{23} = 0,259 \times 0,121$$

$$X_{23} = 0,0313 \text{ m} \rightarrow \text{adotado} = 0,03 \text{ m}$$

Verificação do momento fletor ( $M_d$ ) resistente de cálculo através da Equação 02:

$$M_d = (0,68 \cdot x \cdot d - 0,272 \cdot x^2) \cdot b_w \cdot f_{cd} \quad (2)$$

Onde:

$b_w$  = largura da seção transversal

$f_{cd}$  = resistência de cálculo à compressão do concreto, sendo resultante pela resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ) em função do coeficiente de ponderação da resistência do concreto ( $\gamma_c = 1,4$ ).

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$$

$$f_{cd} = 21.428,57 \text{ kN/m}^2$$

Tem-se:

$$M_d = (0,68 \cdot 0,03 \cdot 0,121 - 0,272 \cdot 0,03^2) \cdot 0,10 \cdot 21.428,57$$

$$M_d = 4,76 \text{ kN.m}$$

Na determinação da área de aço da seção ( $A_s$ ), utilizou-se a Equação 03:

$$A_s = \frac{M_d}{f_{yd} \cdot (d - 0,4x)} \quad (3)$$

Onde:

$f_{yd}$  = Resistência de cálculo do aço;

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15}$$

$$f_{yd} = 434.782,60 \text{ kN.m}^2$$

Tem-se:

$$A_s = \frac{0,0001 \cdot 4,76}{434,782,60 \cdot (0,121 - 0,40,03)} \text{ ou } 1,0 \text{ cm}^2$$

Para a região tracionada da viga, adota-se 2ø8,00 mm obtendo uma  $A_s = 1,00 \text{ cm}^2$ .

Para estimar as cargas pontuais aplicadas pelo aparelho, utilizou-se a Equação 04:

$$M = q \cdot l \quad (4)$$

Onde:

$q$  = carga aplicada

$l$  = distância do carregamento até o apoio

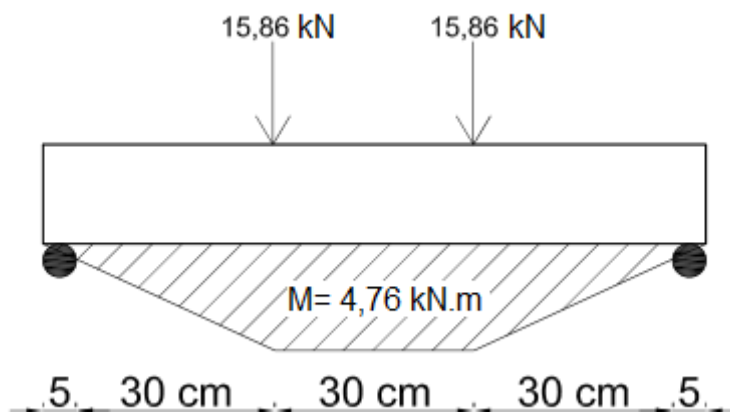
Tem-se:

$$4,76 = q \cdot 0,30$$

$$q = 15,86 \text{ kN}$$

Os carregamentos teóricos no limite do domínio 2-3 aplicadas pelo aparelho, estão ilustradas na Figura 16.

Figura 16 - Carregamentos teóricos



Fonte: Da autora (2018).

### 3.3.2 Armadura ao cisalhamento

Para o cálculo da armadura transversal, seguiu-se o modelo de cálculo I prescrito na seção 17.4.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014), a qual admite que as diagonais de compressão são inclinadas em  $45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural.

Para a verificação da compressão diagonal do concreto, utilizou-se a Equação 05, devendo atender à condição de  $V_{sd} \leq V_{Rd2}$ .

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (5)$$

Onde:

$V_{Rd2}$  = força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas do concreto;

$\alpha_{v2}$  = ângulo de inclinação da armadura transversal, para  $90^\circ$   $\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$

Tem-se:

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{30}{250}\right) \cdot 21.428,57 \cdot 0,10 \cdot 0,121$$

$$V_{Rd2} = 61,60 \text{ kN}$$

Sabendo que a força cortante solicitante  $V_{sd}$  é de 15,86 kN, portanto  $V_{sd} \leq V_{Rd2}$ , não há esmagamento das bielas comprimidas do concreto.

Para o cálculo da força cortante, utilizou-se a Equação 07.

$$V_c = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (7)$$

Onde:

$f_{ctd}$  = resistência de cálculo do concreto ao cisalhamento, dada pela equação

8.

$$f_{ctd} = \frac{0,7 \times 0,3}{\gamma_c} \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (8)$$

Tem-se:

$$V_c = 0,6 \times (1,5 \times 30^3) \times 0,10 \times 0,121$$

$$V_c = 10,51 \text{ kN}$$

A parcela da força cortante que é resistida pela armadura transversal, foi determinada pela Equação 9.

$$V_{sw} = V_{sd} - V_c \quad (9)$$

Tem-se:

$$V_{sw} = 15,86 - 10,51$$

$$V_{sw} = 5,35 \text{ kN}$$

O espaçamento dos estribos foi determinado pela equação 10.

$$V_{sw} = \left( \frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yd} \quad (10)$$

$A_{sw}$ : área da armadura transversal, sendo adotado estribos de dois ramos com 5 mm de diâmetro do tipo aço CA-60, tendo:

$f_{yd}$  = Resistência do aço de cálculo

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15}$$

$$F_{yd} = 521.739,13 \text{ kN/m}^2$$

Tem-se:

$$5,35 = \left( \frac{2 \times 0,000019}{s} \right) \times 0,9 \times 0,121 \times 521.739,13$$

$$S = 0,40 \text{ m ou } 40 \text{ cm}$$

A NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que o espaçamento mínimo deve permitir a passagem da agulha do vibrador, a fim de garantir sua funcionalidade bem como qualidade do concreto. Definiu-se para o caso analisado um espaçamento de 5 cm. Contudo o espaçamento máximo entre os estribos deve atender satisfatoriamente a uma condição.



O espaçamento máximo foi determinado através da Equação 11.

$$V_{sd} \leq 0,67 \cdot V_{rd2} \rightarrow S_{m\acute{a}x} = 0,6 \cdot d \leq 300 \text{ mm} \quad (11)$$

Tem-se:

$$S_{m\acute{a}x} = 0,6 \times 121 \leq 300 \text{ mm}$$

$$S_{m\acute{a}x} = 72,6 \text{ mm ou } 7,26 \text{ cm}$$

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), as vigas devem atender a uma armadura transversal mínima, composta por estribos distribuídos ao longo da extensão do elemento estrutural.

A taxa geométrica mínima foi determinada pela Equação 12.

$$\rho_{sw, \text{ m}\acute{\text{in}}} = 0,2 \left( \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \quad (12)$$

Onde:

$f_{yk}$  = resistência característica do aço;

$f_{ctm}$  = resistência média à tração do concreto, expressa por:  $0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$ ;

Tem-se:

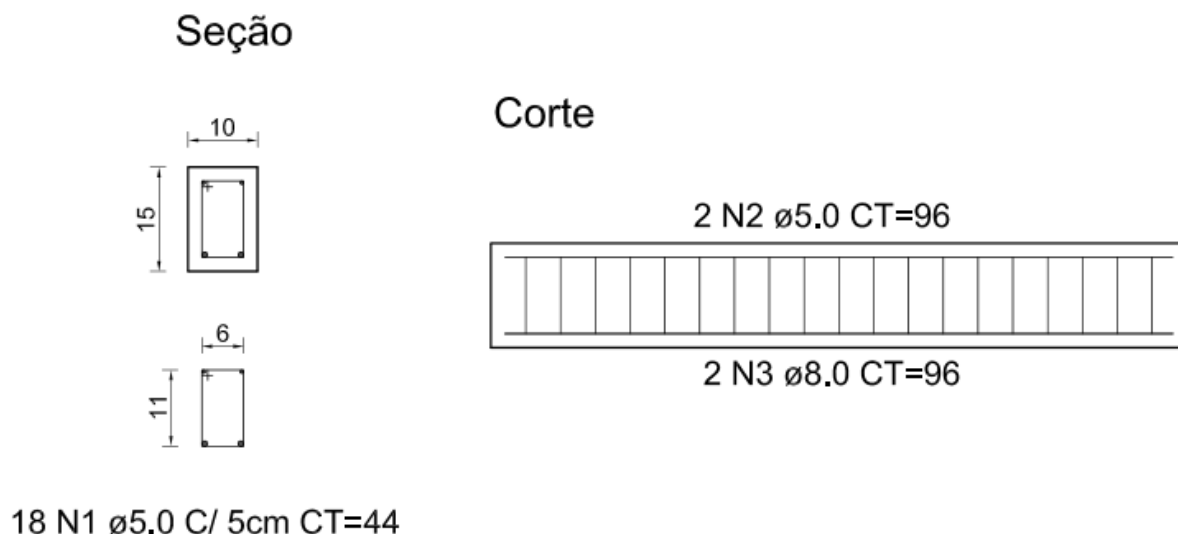
$$\rho_{sw, \text{ m}\acute{\text{in}}} = 0,2 \times \left( \frac{0,3 \times \sqrt[3]{30^2}}{600} \right)$$

$$\rho_{sw, \text{ m}\acute{\text{in}}} = 0,00096$$

Ao multiplicar a taxa mínima de armadura pela área da seção do elemento, obtêm-se 0,14 cm<sup>2</sup> de aço, para o dimensionamento utilizou-se estribos com dois ramos de 5 mm resultando em 0,39 cm<sup>2</sup>, sendo satisfatório a relação.

Assim, de acordo com o dimensionamento apresentado, para o ensaio à flexão serão utilizados estribos de dois ramos de diâmetro de 5 mm, com espaçamento de 5 cm conforme demonstra a Figura 17.

Figura 17 - Detalhamento armadura



Fonte: Da autora (2018).

### 3.4 Processos e dosagens

Para a confecção dos corpos de prova, utilizou-se um concreto com resistência  $F_{ck}$  de 30 MPa, sendo que a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece um  $F_{ck}$  de 25 MPa como mínimo, para que seja considerado um concreto estrutural.

O traço foi definido a partir de Barboza e Bastos (2008), que tem como característica o ganho de resistência em um período de apenas sete dias, sendo o traço de 1:2,59:2,71 em massa e teor a/c de 0,59.

A fim de conferir a veracidade das informações adotadas para os ensaios principais, realizou-se ensaios de compressão diametral em período estipulado, atingindo uma resistência de 34,22 Mpa aos 7 dias, conforme laudo nº 0272 emitido pelo LATEC em 15/08/2018.

### 3.5 Montagem das peças

Para a moldagem dos corpos de prova, confeccionou-se fôrmas em chapas de MDF laminadas, proporcionando uma superfície lisa e impermeável, para evitar a perda de água do concreto devido à absorção. As fôrmas confeccionadas estão demonstradas pela Figura 18.

Figura 18 - Fôrmas em MDF



Fonte: Da autora (2018).

Para o corte e dobra da armadura, utilizou-se mão de obra especializada para garantir a linearidade nos resultados, respeitando o dimensionamento realizado anteriormente. A Figura 19 apresenta alguns dos estribos, demonstrando que os mesmos atenderam satisfatoriamente as dimensões projetadas. Já a Figura 20 apresenta as armaduras à flexão simples montadas e finalizadas.

Figura 19 - Estribos



Fonte: Da autora (2018).

Figura 20 - Armadura à flexão simples



Fonte: Da autora (2018).

O preparo do concreto foi realizado por misturador mecânico com capacidade máxima de 250 litros. Antes de proceder com o lançamento do concreto nas fôrmas, aplicou-se desmoldante nas mesmas, para facilitar na desforma dos elementos.

A concretagem foi realizada de forma individual e posteriormente realizou-se o adensamento com o emprego de vibrador de imersão, conforme apresenta a Figura 21, para eliminar possíveis bolhas de ar, espaços vazios e excesso de água do interior da massa, garantindo um bom acabamento e qualidade do material acomodado no interior da fôrma.

Figura 21 - Adensamento com vibrador de imersão



Fonte: Da autora (2018).

Concluído o lançamento do concreto em todos os elementos, removeu-se o excesso do concreto das fôrmas com o auxílio de espátula metálica, proporcionando um perfeito acabamento em sua superfície conforme apresenta a Figura 22, estando assim prontos para o processo de cura no período de 28 dias. A cura das vigas foi do tipo úmida, em câmara de ar com controle de umidade na própria instituição.

Figura 22 – Vigas concretadas e acabadas



Fonte: Da autora (2018).

### 3.6 Testes Mecânicos

O desenvolvimento da presente pesquisa tem como objetivo desde o princípio, na contribuição para conhecimentos da prática de recuperação em estruturas de vigas em concreto armado. Desta forma, a confiabilidade de uma análise experimental está associada na qualidade e veracidade das informações obtidas, bem como na aplicação dos conhecimentos teóricos para o desenvolvimento das avaliações práticas.

Tendo em vista que a mesma não possui equipamentos específicos para o ensaio realizado, utilizou-se suportes metálicos garantindo a aptidão dimensional do ensaio de quatro pontos realizado na prensa de compressão EMIC 200PLUS, com calibração em 20/08/2018 com certificação de nº 18082001RG.

Os ensaios realizados em todas as vigas se deram pela aplicação de duas cargas concentradas no terço médio do vão das peças.

### 3.6.1 Primeira etapa do ensaio

Para tornar os ensaios mais próximos da realidade e proporcionar mais confiabilidade às análises do reforço estrutural, realizou-se os ensaios em duas etapas, sendo a primeira classificada como pré-carregamento.

Na primeira etapa, as vigas foram submetidas a um carregamento constante até que atingissem seu Estado Limite de Serviço (ELS), que, consiste na deformabilidade do elemento dentro dos limites estabelecidos para o mesmo segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). Para a execução dos ensaios, definiu-se a fissuração e/ou flecha limite como sinais visíveis de comprometimento estrutural.

A partir do dimensionamento estrutural realizado, é possível proceder com os cálculos para identificar a fissuração que ocorrerá na peça quando a mesma estiver em utilização com a carga estimada.

#### 3.6.1.1 Abertura de fissura no ELS

O momento limite em que ocorre a fissuração foi determinado pela Equação 13.

$$M = \frac{\alpha \cdot f_{ctm} \cdot I_c}{y_t} \quad (13)$$

Onde:

$\alpha$  = Fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta, seções retangulares = 1,5;

$f_{ctm}$  = Resistência média à tração do concreto, expressa por:  $0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$ ;

$I_c$  = Momento de inércia da seção bruta, expressa por:  $I_c = \frac{b \cdot h^3}{12}$ ;

$y_t$  = distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada, expressa por:

$$y_t = \frac{h}{2}$$

;

Tem-se:

$$M = \frac{1,5 \times 0,3 \times \sqrt[3]{30} \times \frac{0,1 \times 0,15^2}{12}}{\frac{0,15}{2}} \text{ c}$$

$$M \cong 1,63 \text{ kN.m}$$

A área crítica de fissuração do elemento foi determinada pela Equação 14.

$$A_{crít} = b \cdot (d' + 7,5 \cdot \emptyset) \quad (14)$$

$d'$  = distância entre o centro de gravidade da armadura transversal comprimida e a face mais próxima do elemento estrutural, expressa por:  $d' = h - d$ ;

$\emptyset$  = Diâmetro da barra longitudinal à flexão;

Tem-se:

$$A_{crít} = 0,10 \times (0,029 + 7,5 \times 0,008)$$

$$A_{crít} = 0,0089 \text{ m}^2 \text{ ou } 89 \text{ cm}^2$$

A taxa crítica foi determinada pela Equação 15.

$$\rho_i = \frac{A_s}{A_{crít}} \quad (15)$$

Tem-se:

$$\rho_i = \frac{1,00}{89}$$

$$\rho_i = 0,011$$

A tensão na armadura foi determinada pela Equação 16.

$$\sigma_{si} = \frac{f_y d}{1,4} \times \frac{1,0 + 0,4 \cdot q}{g + q} \quad (16)$$

Tem-se:

$$\sigma_{si} = \frac{434.782,60}{1,4} \times \frac{1,0,20 + 0,4 \cdot 15,86}{0,20 + 15,86} \quad \sigma_{si} = 126.544,09 \text{ kN/m}^2$$

A abertura de fissuras foi determinada pelas Equações 17 e 18.

$$W' = \frac{0}{12,5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3 \cdot \sigma_{si}}{f_{ctm}} \quad (17)$$

$\eta_1$  = coeficiente de conformação superficial, armadura nervurada = 2,25;

$E_{si}$  = módulo de elasticidade do aço = 210.000.000 kN/m<sup>2</sup>;

Tem-se:

$$W' = \frac{0}{12,5 \cdot 2,25} \cdot \frac{126.544,09}{210.000.000} \cdot \frac{3 \cdot 126.544,09}{0,3 \cdot \sqrt[3]{30000}^2}$$

$$W' = 0,2246 \text{ mm}$$

$$W' = \frac{0}{12,5 \cdot \eta_1} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \left( \frac{4}{\sigma_{si}} + 45 \right) \quad (18)$$

$$W' = \frac{0}{12,5 \cdot 2,25} \cdot \frac{126.544,09}{210.000.000} \cdot \left( \frac{4}{0,011} + 45 \right)$$

$$W' = 0,062 \text{ mm}$$

Após a realização do cálculo das fissuras, adotou-se a menor delas sendo 0,062 mm, pois esta ocorrerá primeiro, estando localizada na área crítica de fissuração. A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece exigências de durabilidade que estão relacionadas à abertura de fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental. Para o caso em análise o mesmo não pode exceder à 0,4 mm.

### 3.6.1.2 Deslocamentos ELS

A posição da linha neutra no estado limite de serviço foi determinada pela Equação 19.

$$x' = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (19)$$

Onde:

$a$  = coeficiente de Bhaskara dado por  $a = \frac{bw}{2}$ ;

$b$  = coeficiente de Bhaskara dado por  $b = \frac{Es}{0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}} \cdot A_s$ ;

$c$  = coeficiente de Bhaskara dado por  $c = -d' \cdot \frac{Es}{0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}} \cdot A_s$ ;



Tem-se:

$$x' = \frac{-\frac{210000}{0,85 \times 5600 \times \sqrt{30}} x1 \pm \sqrt{\left(\frac{210000}{0,85 \times 5600 \times \sqrt{30}} x1\right)^2 - 4x\left(\frac{10}{2}\right)x(-2,9x\left(\frac{210000}{0,85 \times 5600 \times \sqrt{30}}\right)x1)}}{2x\frac{10}{2}}$$

$$x' = \frac{-8,05 \pm 23,06}{10}$$

$$x' = 1,50 \text{ cm}$$

A inércia do elemento em seu estado limite de serviço foi determinada pela Equação 20.

$$I'' = \frac{bw \cdot x'^2}{3} + As \cdot \frac{Es}{Ecs} \cdot (d - x')^2 \quad (20)$$

Tem-se:

$$I'' = \frac{10 \times 1,50^2}{3} + 1 \times 8,05 \times (12,1 - 1,50)^2$$

$$I'' = 962,56 \text{ cm}^4 \text{ ou } 0,000096 \text{ m}^4$$

A rigidez equivalente do elemento foi determinada pela Equação 21.

$$Elq = Ecs \cdot \left(\frac{M}{Mels}\right)^3 \cdot Ic + \left[1 - \left(\frac{M}{Mels}\right)^3\right] \cdot I'' \quad (21)$$

$$Elq = 26071593 \cdot \left(\frac{1,63}{2,10}\right)^3 \cdot \left(\frac{0,10 \times 0,15^3}{12}\right) + \left[1 - \left(\frac{1,63}{2,10}\right)^3\right] \cdot 0,000096$$

$$Elq = 342,89 \text{ KN.m}^2$$

A flecha imediata ou instantânea foi determinada pela Equação 22.

$$fi = \frac{\alpha_c \cdot Mels \cdot l^2}{Elq} \quad (22)$$

Onde:

$\alpha_c$  = Coeficiente que depende da condição estática do sistema dado por

$$\alpha_c = \frac{1}{4} \cdot [3 - 4 \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2] \text{ onde:}$$

a = Distância da carga até o apoio;

$l$  = vão livre do carregamento

Tem-se:

$$f_i = \frac{\frac{1}{4} \cdot [3 - 4 \cdot (\frac{0,3}{0,9})^2] \cdot 2,10 \cdot 0,9^2}{342,89}$$

$$f_i = 3,17 \times 10^{-3} \text{ m ou } 3,17 \text{ mm}$$

De acordo com o prescrito no item 13.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014), o limite para deslocamento em elementos com efeitos estruturais é de  $l/250$ , ou seja, para o caso apresentado, 3,6 mm. Assim, adotou-se a flecha imediata de 1,9 mm.

### 3.6.1.3 Ensaio com o pré-carregamento

Definido então os limites do carregamento e o método de ensaio para a primeira etapa, aplicou-se a carga nos corpos de prova, até que os mesmos apresentassem as deformações definidas sendo os valores de 1,9 mm para deformação e 0,062 mm para abertura de fissuras.

A carga foi aplicada de forma constante e manual, pois no modo automático o equipamento atua com o carregamento até a ruína do corpo de prova, não conseguindo proceder com a interrupção do mesmo.

Assim, durante a aplicação do carregamento, foi observada a deformação sofrida pelas peças, sendo a mesma fornecida pelo equipamento de ensaio, também, se observou as fissuras que eram evidentes no decorrer do ensaio, sendo aferido com o auxílio de um fissurômetro.

Podemos verificar através da Figura 23 o procedimento do ensaio realizado nesta primeira etapa, com os suportes metálicos utilizados para execução do mesmo.

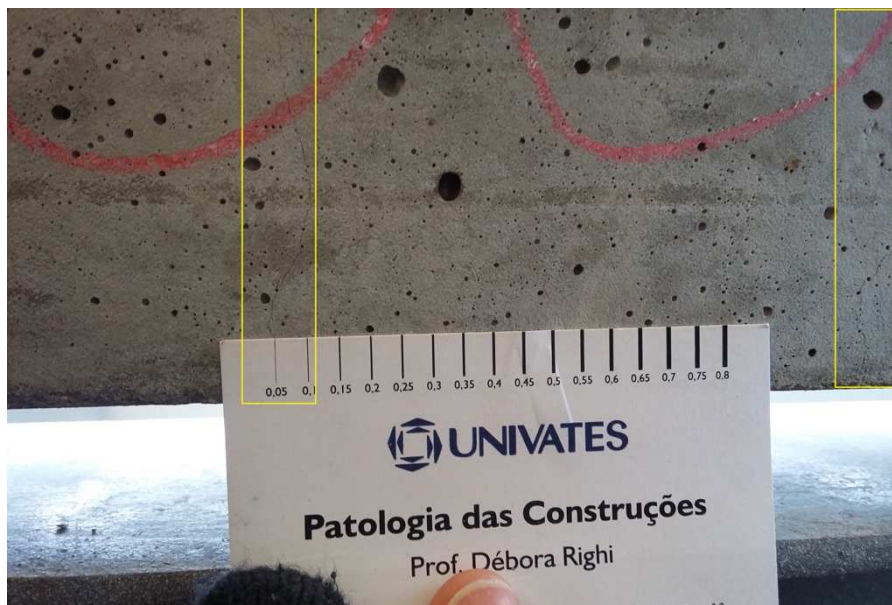
Figura 23 - Pré-carregamento das vigas



Fonte: Da autora (2018).

As microfissuras que surgiram na parte tracionada das vigas atenderam satisfatoriamente aos cálculos realizados para sua abertura no estado limite de serviço, e as mesmas podem ser conferidas na Figura 24.

Figura 24 - Pré-carregamento das vigas



Fonte: Da autora (2018).

### 3.7 Aplicação dos reforços nas vigas

Para o procedimento de colagem do reforço, utilizaram-se resinas específicas para tal finalidade, proporcionando maior aderência das fibras ao elemento a ser reforçado. As resinas são fabricadas pela empresa Viapol, sendo esta considerada uma das maiores indústrias em soluções químicas para a construção civil na América Latina.

De acordo com as instruções de utilização do fabricante, a superfície deve estar sólida, sem partículas soltas, livre de impurezas como graxas, óleos, ferrugens, entre outros, e com uma umidade de até 4%.

Ainda, segundo o fabricante as peças que receberem o envelopamento com fibras, deverão ter os cantos externos arredondados com um raio mínimo de 10 mm, e, nos casos em que existirem fissuras superiores a 0,2 mm, as mesmas deverão ser analisadas e se necessário tratadas.

Primeiramente, com o auxílio de uma trincha efetuou-se a limpeza da superfície, após, com a utilização de um rolo de lã aplicou-se uma fina camada do primer, que tem como finalidade eliminar a porosidade do concreto, promovendo então uma aderência adequada no substrato e prepará-lo para receber as próximas etapas. A Figura 25 apresenta os elementos com a imprimação concluída. Após isto, em um intervalo de 5 horas procedeu-se a próxima etapa.

Figura 25 - Imprimação da superfície



Fonte: Da autora (2018).

Nos casos em que a superfície apresentar buracos ou falhas de concretagem, o fabricante recomenda a aplicação de estucamento, ou seja, regularização da superfície e preenchimento com resina epóxi.

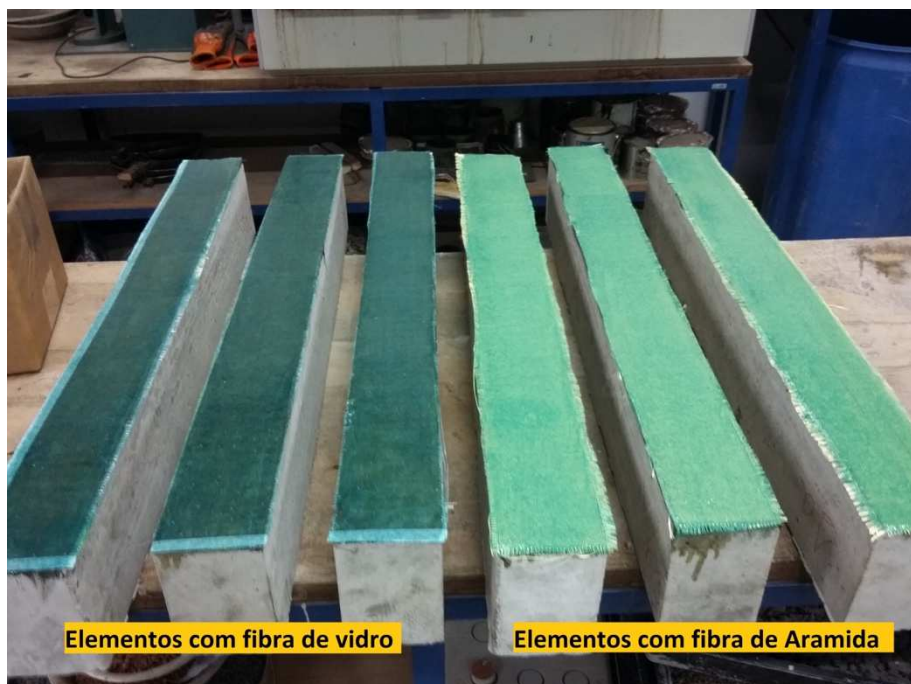
Com o auxílio de um rolo de lã, aplicou-se uma camada uniforme da resina para esta etapa de aproximadamente  $0,25 \text{ Kg/m}^2$ , seguindo a recomendação do fabricante. Em um intervalo de 10 minutos efetuou-se a colagem dos tecidos de fibra de vidro e fibra de aramida sobre o material ainda no estado plástico. As fibras foram pressionadas firmemente com o auxílio de um rolo de madeira, sendo rolado no sentido longitudinal das fibras até sua perfeita aderência. Após aproximadamente 40 minutos, aplicou-se uma nova camada da resina com o mesmo consumo que o anterior, para proteção das fibras. As Figuras 26 e 27 apresentam a aplicação da primeira camada da resina e as peças concluídas com a camada de proteção das fibras respectivamente.

Figura 26 - Camada epóxi anterior à colagem



Fonte: Da autora (2018).

Figura 27 - Aplicação do reforço concluído



Fonte: Da autora (2018).

Conforme especificação do fabricante, a cura total da resina é de 7 dias, e este prazo foi respeitado para proceder a próxima etapa do ensaio.

### 3.8 Ensaio final

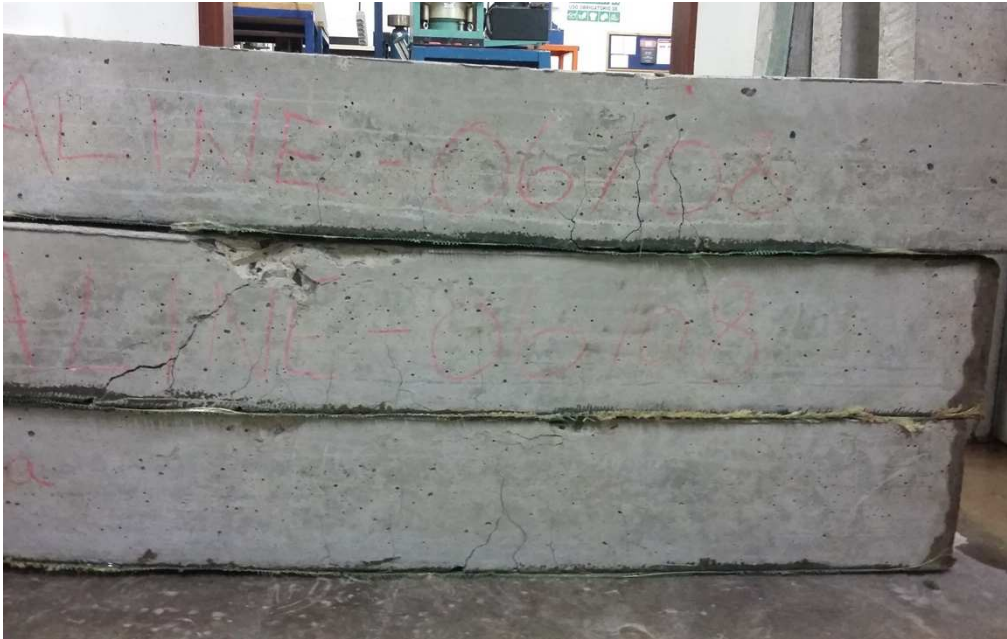
Passados os 7 dias de cura total do reforço, as vigas passaram para a próxima etapa dos ensaios, a qual contempla o carregamento até o Estado Limite Último (ELU) dos elementos estruturais, ou seja, até o elemento ruir.

Os ensaios realizados nesta etapa seguiram o mesmo método realizado na etapa do pré-carregamento. A carga foi aplicada de forma constante, até o momento em que o equipamento identificou a ruína dos elementos.

Primeiramente, foram ensaiadas as vigas do grupo 1, que consistem nos elementos reforçados à flexão com fibra de aramida (FIGURA 28), posteriormente as vigas do grupo 2 (FIGURA 29), que consistem nos elementos reforçados à flexão com fibra de vidro e por final, ensaiou-se as vigas do grupo 3 (FIGURA 30), que não contemplam reforço.

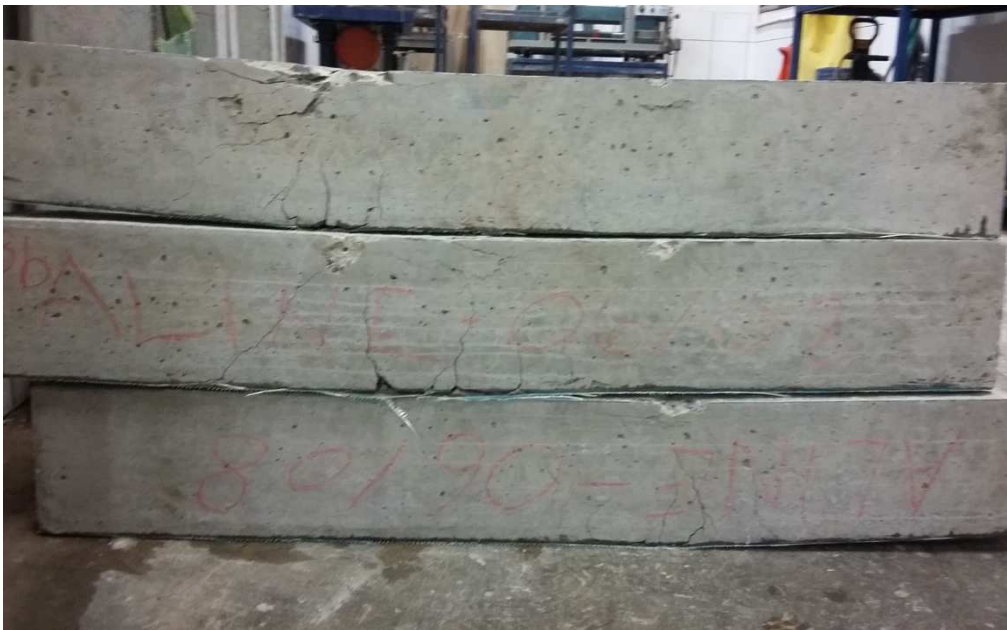


Figura 28 - Elementos reforçados com fibra de aramida



Fonte: Da autora (2018).

Figura 29 - Elementos reforçados com fibra de vidro



Fonte: Da autora (2018).

Figura 30 - Elementos sem aplicação do reforço



Fonte: Da autora (2018).



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

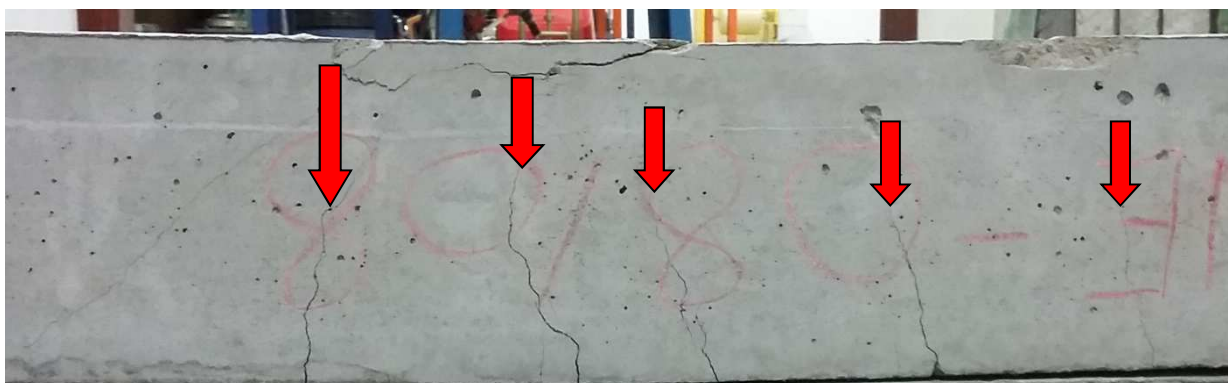
O presente capítulo irá abordar as análises e discussões dos resultados obtidos através dos ensaios propostos pelo programa experimental, descritos no capítulo anterior, visando à análise dos objetivos principais e específicos propostos pelo presente trabalho. Ressalta-se, que os resultados obtidos passaram por um tratamento estatístico, obtendo uma média e desvio padrão, visando eliminar os resultados que se encontraram fora do desvio padrão.

### **4.1 Resultados do Grupo 3: sem reforço à flexão**

Os corpos de prova sem reforço, que consistem nos elementos do Grupo 3, foram ensaiados com a aplicação de um carregamento constante. Com o elemento posicionado no equipamento de ensaio, iniciou-se o carregamento na peça, começando a surgir algumas fissuras localizadas no centro da peça de forma perpendicular ao sentido longitudinal do elemento. As fissuras apresentadas são características dos esforços à flexão.

A medida que era aumentado o carregamento na viga 3A, observou-se a evolução das aberturas de fissuras no centro da mesma, conforme ilustra a Figura 31. A capacidade limite de carga da viga se deu após o esmagamento da biela comprimida de sua seção, o qual teve um carregamento máximo de 75,6 kN e deslocamento de 7,5 mm.

Figura 31 - Viga 3A



Fonte: Da autora (2018).

A viga 3B também apresentou fissuras localizadas no centro da peça de forma perpendicular ao sentido longitudinal do elemento, sendo estas devido aos esforços à flexão. Ainda, apresentou algumas fissuras transversais em um dos terços médios do vão, sendo influenciada por parcela de esforços de cisalhamento conforme ilustra a Figura 32. A capacidade limite de carga em que o elemento resistiu se deu após o escoamento do aço, alcançando um carregamento de 74,6 kN e deslocamento de 5,4 mm.

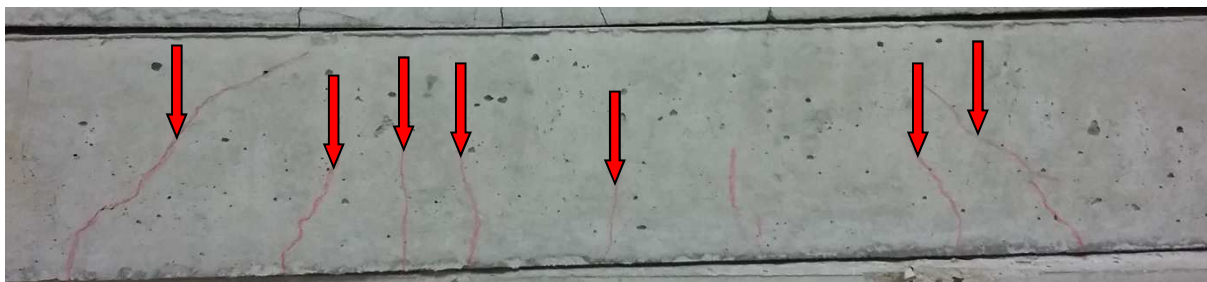
Figura 32 - Viga 3B



Fonte: Da autora (2018).

Assim como as vigas 3A e 3B, a viga 3C também apresentou fissuras localizadas no centro da peça de forma perpendicular ao sentido longitudinal do elemento, no entanto, a peça 3C apresentou fissuras transversais com inclinação aproximada de 45 graus próximas aos apoios, resultantes dos esforços de cisalhamento, conforme ilustra a Figura 33. A capacidade limite de carga em que o elemento resistiu se deu após o escoamento do aço, alcançando um carregamento de 66,1 kN e deslocamento de 5,0 mm.

Figura 33 - Viga 3C



Fonte: Da autora (2018).

Os resultados do Grupo 3 são apresentados na Tabela 11, contendo o tratamento estatístico para os valores encontrados.

Tabela 11 – Tratamento estatístico Grupo 3

DADOS ENSAIO						TRATAMENTO ESPÚRIOS		
Código	Carga (kN)	F <sub>cj</sub> (Mpa)	Desvio Padrão	Média	Limites	F <sub>cj</sub> (Mpa)	Média Nova	Novo desvio Padrão
3a	75,60	10,67	0,74	10,17	11,65	10,67	10,60	0,53
3b	74,60	10,52				10,52		
3c	66,10	9,33			9,54			

Fonte: Da autora (2018).

Depois de realizado o tratamento estatístico dos resultados alcançados, o mesmo identificou que o elemento 3C é suspeito e indica que seja eliminado, portanto optou-se por não utilizar os dados deste elemento para a correlação do grupo. A baixa capacidade de carga do elemento 3C possivelmente foi motivada pela interferência dos esforços de cisalhamento, resultando na ruína precoce do mesmo.

## 4.2 Resultados do Grupo 2: reforçado à flexão com fibra de vidro

Os elementos do Grupo 2, consistem nas peças recuperadas com polímeros reforçados com fibra de vidro, as quais foram posicionadas no equipamento e após, aplicado um carregamento constante até atingirem sua capacidade limite.

A viga 2A foi posicionada no equipamento e após iniciou-se o carregamento constante no elemento e conforme o carregamento aumentava, as fissuras iam

surgindo gradativamente. As fissuras se localizavam no centro da peça de forma perpendicular ao sentido longitudinal do elemento, sendo estas devido aos esforços à flexão e se agravaram ao longo do carregamento. A capacidade limite de carga que o elemento resistiu foi no momento em que houve o rompimento repentino do reforço, atingindo um carregamento de 74,04 kN e deslocamento de 10 mm. Através da Figura 34 podemos identificar o ponto de rompimento da fibra evidenciando que a mesma ocorreu devido aos esforços à flexão.

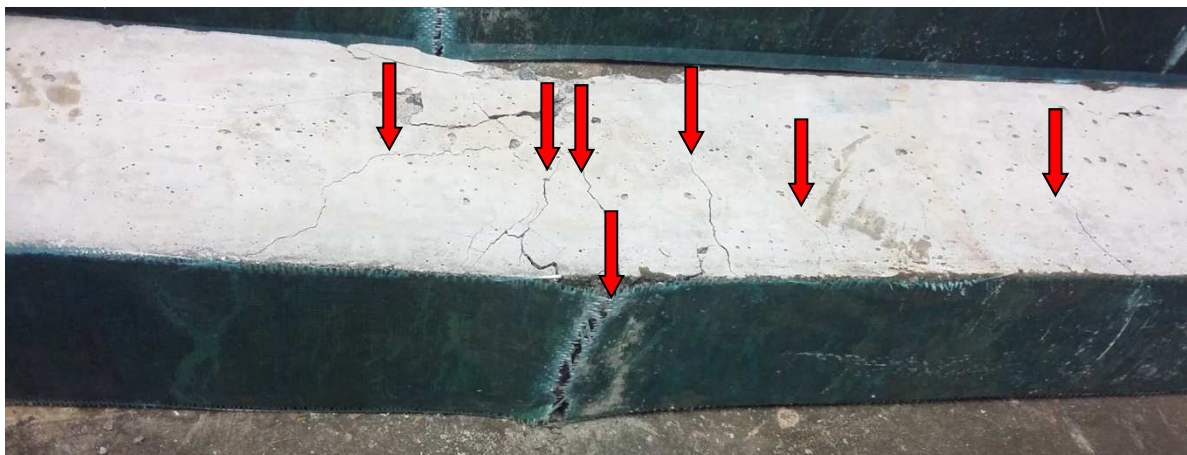
Figura 34 - Viga 2A



Fonte: Da autora (2018).

A viga 2B assim como a primeira, foi posicionada no equipamento e após iniciou o carregamento constante no elemento, conforme o carregamento aumentava, as fissuras iam surgindo gradativamente. As fissuras se localizavam na parte inferior da peça junto ao terço médio da mesma de forma perpendicular ao sentido longitudinal do elemento, sendo estas devido aos esforços à flexão e se agravaram ao longo do carregamento, também, pode-se observar que houve esmagamento da biela comprimida de sua seção assim como o surgimento de pequenas fissuras transversais com inclinações a 45 graus, próximas aos apoios. A capacidade limite de carga que o elemento resistiu foi no momento em que houve o rompimento repentino do reforço, atingindo um carregamento de 76,72 kN e deslocamento de 14 mm. Através da Figura 35 podemos identificar o ponto de rompimento da fibra evidenciando que a mesma ocorreu devido aos esforços à flexão.

Figura 35 - Viga 2B



Fonte: Da autora (2018).

A viga 2C, assim como as demais do Grupo, foi posicionada no equipamento e após iniciou o carregamento constante no elemento, conforme o carregamento aumentava, as fissuras iam surgindo gradativamente. As fissuras se localizavam na parte inferior da peça ao centro da mesma de forma perpendicular ao sentido longitudinal do elemento, sendo estas devido aos esforços à flexão e se agravaram ao longo do carregamento, também surgiu uma fissura transversal a aproximadamente 45 graus, próximo ao apoio superior, sendo esta característica aos esforços de cisalhamento. A capacidade limite de carga que o elemento resistiu foi no momento em que houve o rompimento repentino do reforço, atingindo um carregamento de 75,95 kN e deslocamento de 11,2 mm. Através da Figura 36 podemos identificar o ponto de rompimento da fibra evidenciando que a mesma ocorreu devido aos esforços à flexão.

Figura 36 - Viga 2C



Fonte: Da autora (2018).

Os resultados do Grupo 2 são apresentados na Tabela 12, contendo o tratamento estatístico para os valores encontrados.

Tabela 12 – Tratamento estatístico Grupo 2

DADOS ENSAIO					TRATAMENTO ESPÚRIOS			
Código	Carga (kN)	F <sub>cj</sub> (Mpa)	Desvio Padrão	Média	Limites	F <sub>cj</sub> (Mpa)	Média Nova	Novo desvio Padrão
2a	74,04	10,45	0,19	10,66	11,85		10,77	0,54
2b	76,72	10,82				10,82		
2c	75,95	10,71			9,69	10,71		

Fonte: Da autora (2018).

Depois de realizado o tratamento estatístico dos resultados alcançados para o Grupo 2, o mesmo identificou que o elemento 2A é suspeito, porém não foi eliminado pois seu valor fica dentro dos limites do desvio padrão.

#### 4.3 Resultados do Grupo 1: reforçados à flexão com fibra de aramida

Os elementos do Grupo 1 consistem nas peças recuperadas com polímeros reforçados com fibra de aramida, as quais foram posicionadas no equipamento e após, aplicado um carregamento constante até atingirem sua capacidade limite.

A viga 1A foi posicionada no equipamento e após iniciou o carregamento constante no elemento, conforme o carregamento aumentava, as fissuras iam surgindo gradativamente. As fissuras se localizavam no centro da peça de forma perpendicular ao sentido longitudinal do elemento, sendo estas devido aos esforços à flexão e se agravaram ao longo do carregamento. A capacidade limite de carga que o elemento resistiu foi no momento em que houve o rompimento repentino do reforço, atingindo um carregamento de 80 kN e deslocamento de 10,6 mm. Através da Figura 37 podemos identificar o ponto de rompimento da fibra evidenciando que a mesma ocorreu devido aos esforços à flexão, ainda, é possível observar o surgimento de uma microfissura transversal a aproximadamente 45 graus, localizada próximo ao apoio superior, sendo esta característica ao esforço cisalhamento.



Figura 37 - Viga 1A



Fonte: Da autora (2018).

A viga 1B assim como a primeira, foi posicionada no equipamento e após iniciou o carregamento constante no elemento, conforme o carregamento aumentava, as fissuras iam surgindo gradativamente. As fissuras se localizavam na parte inferior da peça com maior concentração junto ao terço médio da mesma de forma perpendicular ao sentido longitudinal do elemento, sendo estas devido aos esforços à flexão e se agravaram ao longo do carregamento. A capacidade limite de carga que o elemento resistiu foi no momento em que houve o rompimento repentino do reforço, atingindo um carregamento de 81,73 kN e deslocamento de 11,4 mm. Através da Figura 38 podemos identificar o ponto de rompimento da fibra evidenciando que a mesma ocorreu devido aos esforços à flexão, ainda, é possível observar o surgimento de uma microfissura transversal a aproximadamente 45 graus, localizada próximo ao apoio superior, sendo esta característica ao esforço cisalhamento.

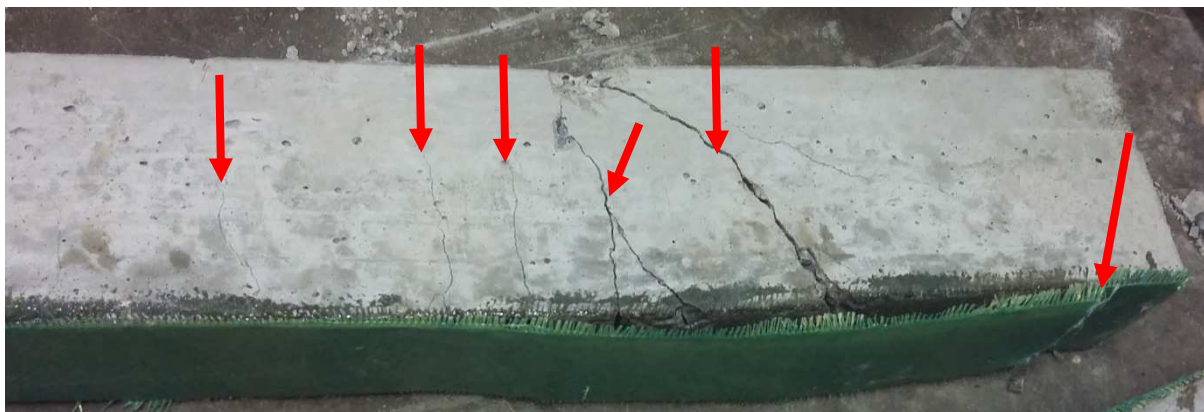
Figura 38 - Viga 1B



Fonte: Da autora (2018).

A viga 1C assim como as demais do Grupo, foi posicionada no equipamento e após iniciou o carregamento constante no elemento, conforme o carregamento aumentava, as fissuras iam surgindo gradativamente. As fissuras se localizavam na parte inferior da peça ao centro da mesma de forma perpendicular ao sentido longitudinal do elemento, sendo estas devido aos esforços à flexão e se agravaram ao longo do carregamento, também surgiu uma fissura transversal a aproximadamente 45 graus, próximo ao apoio superior, sendo esta a mais evidente devido aos esforços de cisalhamento. A capacidade limite de carga que o elemento resistiu foi no momento em que houve o rompimento repentino do reforço, atingindo um carregamento de 76,12 kN e deslocamento de 10,9 mm. Através da Figura 39 podemos identificar o ponto de rompimento da fibra evidenciando que a mesma ocorreu devido aos esforços de cisalhamento.

Figura 39 - Viga 1C



Fonte: Da autora (2018).



Os resultados do Grupo 1 são apresentados na Tabela 13, contendo o tratamento estatístico para os valores encontrados.

Tabela 13 – Tratamento estatístico Grupo 1

DADOS ENSAIO					TRATAMENTO ESPÚRIOS			
Código	Carga (kN)	F <sub>cj</sub> (Mpa)	Desvio Padrão	Média	Limites	F <sub>cj</sub> (Mpa)	Média Nova	Novo desvio Padrão
1a	80,00	11,29	0,41	11,19	12,55	11,29	11,41	0,57
1b	81,73	11,53				11,53		
1c	76,12	10,74			10,27			

Fonte: Da autora (2018).

Depois de realizado o tratamento estatístico dos resultados alcançados para o Grupo 1, o mesmo identificou que o elemento 1C é suspeito, porém não é eliminado pois seu valor fica dentro dos limites do desvio padrão. A diferença de capacidade de carga do elemento 1C em relação às demais do Grupo, possivelmente foi motivada pela interferência dos esforços de cisalhamento, que é facilmente identificado pela imagem apresentada, contudo, o reforço se apresentou eficaz com a interferência do esforço cortante.

#### 4.4 Resultados entre os grupos reforçados à flexão

Os resultados obtidos pelos Grupos 1, 2 e 3 estão apresentados pela Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados entre os Grupos no ELU

Carregamento final				
		Carga (kN)	Deformação (mm)	Ganho de resistência
Aramida	Grupo 1 - Média	80,88	10,97	7,64 %
Vidro	Grupo 2 - Média	76,34	11,73	1,60 %
Branco	Grupo 3 - Média	75,14	6,46	-

Fonte: Da autora (2018).

Analisando as médias dos grupos de ensaio à flexão simples, é possível verificar o ganho de resistência dos elementos reforçados com os compósitos de fibras de aramida e fibras de vidro, caracterizada como resistência no estado limite último (ELU).

## 5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como principal objetivo, analisar a eficiência do uso de polímeros reforçados com fibra de aramida e fibra de vidro, na recuperação de vigas em concreto armado ensaiados à flexão simples.

Em análise aos resultados obtidos, é possível concluir que houve um acréscimo de resistência dos elementos reabilitados, no entanto os valores encontrados não são muitos expressivos. Para o uso de compósitos reforçados com fibra de aramida, o método se apresentou mais eficiente em relação ao compósito reforçado com fibra de vidro, apresentando um acréscimo de resistência na ordem de 7,64% e 1,60% respectivamente no ELU.

De acordo com o estudo realizado por Battisti (2017), o qual avaliou a eficiência na recuperação em vigas de concreto armado com o emprego de polímero reforçado com fibra de carbono, ensaiados à flexão simples, o mesmo atingiu um acréscimo de resistência de aproximadamente 40% no ELU. Os resultados expostos no presente capítulo condizem com o gráfico publicado por Machado (2012), constante no capítulo 2 da presente pesquisa.

Com relação ao comportamento dos elementos reforçados, durante os ensaios foi possível verificar que para ambos os reforços, os mesmos não demonstravam evidências de alcançar sua capacidade limite, geralmente fissuravam gradativamente e, de modo repentino, ocorria a ruptura do reforço.

Em relação à técnica de aplicação do reforço, conclui-se que o mesmo é muito simples embora sejam necessários alguns cuidados aos quais a sua eficiência está diretamente relacionada. A praticidade de sua aplicação pode ser uma das maiores vantagens em relação aos demais métodos de reforços.

Atualmente, o método pesquisado é o que há e mais moderno relacionado à tecnologia de reabilitação de estruturas de concreto armado, embora seja necessário mais estudo para uma afirmação mais conclusiva. Desta forma, sugere-se para trabalhos futuros, a análise de recuperação estrutural, com a aplicação de mais de uma camada do compósito variando o sentido de aplicação do mesmo, também a análise da aplicação do reforço em todas as faces do elemento.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_- **ABNT. NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_- **ABNT. NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

\_\_\_\_\_- **ABNT. NBR 12142**: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos – Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BATTISTI, Fernando. **Recuperação de vigas em concreto armado utilizando polímero reforçado com fibras de carbono**. Monografia (Graduação), Universidade do Vale do Taquari Univates. Lajeado, 2017. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/handle/10737/1923>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

BARBOZA, Marcos R.; BASTOS, Paulo Sérgio. **Traço de concreto para obras**. UNESP, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Civil 2008. Disponível em: [http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/site\\_paulo/Artigo%20Tracos%20ConcretoPaulo%20Bastos.pdf](http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/site_paulo/Artigo%20Tracos%20ConcretoPaulo%20Bastos.pdf). Acesso em: 30 jul. 2018.

BEBER, Andrei José. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósito de fibras de carbono**. Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/2974>>. Acesso em: 06 mai. 2018

BORGES, Igor de Oliveira. **Estudo de Reforço de Vigas e Lajes com Compósitos de Fibras de Carbono Colados**. Monografia (Graduação), Universidade de Brasília. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://bdm.unb.br/handle/10483/17277>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CATEB, Lucas Carvalho. **Concreto com armadura de fibra de vidro**. Monografia (Graduação), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-9CAFPY>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4. ed. São Paulo: Edufscar, 2015.

CLÍMACO, João Carlos Teatini de Souza. **Estruturas de concreto armado**: Fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação. 2 ed revisada. Brasília. Editora Universidade de Brasília: Finatec, 2008.

COUTO, João P. **Importância da revisão dos projetos na redução dos custos De manutenção das construções**. Universidade de Coimbra, Portugal, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/8754>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

FIBERTEX. **Informação do produto**. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br/wp-content/uploads/2014/05/AR-01781.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

E-COMPÓSITES. **Descrição**. Disponível em: <[http://www.marinecomposites.com.br/wp-content/uploads/datasheets/tecido\\_de\\_vidro\\_re200p.pdf](http://www.marinecomposites.com.br/wp-content/uploads/datasheets/tecido_de_vidro_re200p.pdf)>. Acesso em: 21 mai. 2018.

GARCEZ, Mônica Regina. **Alternativas para a melhoria do desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras**. Porto Alegre, 2007. p. 68. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/10593>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

GERDAU. **Propriedades do aço**. Disponível em: <<http://www.gerdau.com/br/pt/produtos/vergalhao-gerdau>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

JUVANDES, Luis Felipe Pereira. **Reforço e reabilitação de estruturas**. Universidade do Porto, Departamento de engenharia civil, Departamento de estruturas, módulo 2, 2002.

KIMURA, Alio Ernesto. Comitê Técnico Concreto Estrutural (Org.). **Comentários Técnicos e Exemplos de Aplicação da NB-1**: Projeto de estruturas de concreto. São Paulo: Ibracom, 2007. 260 p.

LEGGERINI, Maria Regina Costa; AMÉRICO, Campos Filho. **Estado Limite de Serviço de Abertura de Fissuras em Seções de Concreto Armado Submetidas à Flexão Simples**. Brasília: Cobenge, 2004.

LEONHARDT, Fritz. **Construções de concreto, vol.4**. RIO DE JANEIRO: Interciência, 2012. 210p

LIBRELOTTO, Lisiane Ilha; FERROLI, Paulo César Machado. **Ciclos de vida-fibras sintéticas**. Santa Catarina, 2016. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0BzAUcJjLBprtYUc3R1ZKMlBmdlE/view>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

MACHADO, Ari de Paula. Manual da Viapol: **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. 2012. p. 5. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

MARCELLI, Mauricio. Sinistros na construção civil: **Causas e Soluções para Danos e Prejuízos em Obra**. São Paulo: Pini, 2007.

MARIN, Júlia Senger; BRASIL Karine Fernandes. **Controle de retração plástica em laje de cobertura de concreto armado**. Monografia (Graduação), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7709/1/PB\\_COECI\\_2016\\_1\\_07.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7709/1/PB_COECI_2016_1_07.pdf)>. Acesso em: 01 jun. 2018.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. São Paulo: Ibracon, 2011.

REIS, Lília Silveira Nogueira. **Recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. Belo Horizonte, 2001. Disponível em: [http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUDB958AKG76/sobre\\_a\\_recupera\\_o\\_e\\_refor\\_o\\_das\\_estruturas\\_do\\_concreto\\_armado.pdfsequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUDB958AKG76/sobre_a_recupera_o_e_refor_o_das_estruturas_do_concreto_armado.pdfsequence=1).

SANTOS, Anna Luiza de Castro. **Reforço à Flexão de Vigas de Concreto com Tecido de Fibra de Carbono pré-tracionado**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <[http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio\\_resumo2012/relatorios\\_pdf/ctc/CIV/CIV-Anna%20Luiza%20de%20Castro%20Santos.pdf](http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2012/relatorios_pdf/ctc/CIV/CIV-Anna%20Luiza%20de%20Castro%20Santos.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2018.

SILVA, Henrique Pereira da; **Comportamento Mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados**. Tese (Doutorado), Universidade de Coimbra. Coimbra, 2014. Disponível em < <https://core.ac.uk/download/pdf/43579528.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2018.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

TRINDADE, Diego dos Santos da. **Patologia em Estrutura de Concreto Armado**. Monografia (Graduação) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015. Disponível em: <[http://coral.ufsm.br/engcivil/images/PDF/2\\_2015/TCC\\_DIEGO%20DOS%20SANTOS%20DA%20TRINDADE.pdf](http://coral.ufsm.br/engcivil/images/PDF/2_2015/TCC_DIEGO%20DOS%20SANTOS%20DA%20TRINDADE.pdf)>. Acesso em 05 mai. 2018.

ZANGIACOMI, Marco Henrique; BITTENCOURT, Edison. **Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra de PANox e Firas de Aramida**. Recife, 2006. P. 61.

Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/viewFile/530/490>>.  
Acesso em: 01 jun. 2018.

ZUCCHI, Fernando Luiz. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais.**  
Monografia (Graduação) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.  
Disponível em:  
<[http://coral.ufsm.br/engcivil/images/PDF/2\\_2015/TCC\\_FERNANDO%20LUIZ%20ZUCCHI.pdf](http://coral.ufsm.br/engcivil/images/PDF/2_2015/TCC_FERNANDO%20LUIZ%20ZUCCHI.pdf)>. Acesso em: 13 jan. 2018.



